tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 51 – Nr. 2 – 1986

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Postbus 39, 2260AA Leidschendam. Gironummer 94746
t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

De vereniging stelt zich ten doel het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de elektronica en de informatietransmissie en - verwerking te bevorderen en de verbreiding en toepassing van de verworven kennis te stimuleren.

Lidmaatschap

Voor lidmaatschap wende men zich tot de secretaris. Het lidmaatschap staat open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbarellidmaatschap mogelijk maakt. De contributie bedraagt fl.60.-per jaar.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium kontakt op te nemen met de voorzitter van de redactie commissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt f 60,--. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

DE EXAMENS

De door het Genootschap ingestelde examens worden afgenomen in samenwerking met de "Vereniging tot bevordering van Elektrotechnisch Vakonderwijs in Nederland (V.E.V.)". Het betreft de examens:

a. op lager technisch niveau: "Elektronica monteur N.E.R.G.";
b. op middelbaar technisch niveau: "Middelbaar Elektronica technicus N.E.R.G.".

Voor deelname, inlichtingen omtrent exameneisen, reglement, en uitgewerkte opgaven wende men zich tot het Centraal Bureau van de V.E.V., Barneveldseweg 39, 3862 PB Nijkerk; tel. 03494 - 4844.

LASERS EN HUN TOEPASSING

Dr. G.J. Ernst
TH Twente

Laserfysica en aanverwante onderwerpen is de jongste tak uit de optica en bestaat slechts ca. 25 jaar. De eerste laser, een robijnlaser is gebouwd in de VS door Maiman in 1960.
De optica zelf is een tak van de natuurkunde die door de eeuwen heen een ontzagwekkende invloed heeft uitgeoefend op de wetenschap en instrumentatie. Reeds in de vroege historie van de natuurwetenschappen heeft het onderzoek naar optische verschijnselen een belangrijke rol gespeeld en veel optische instrumenten hebben de kennis over andere takken van de natuurkunde maar ook over andere wetenschappen in belangrijke mate verhoogd. Denk bijvoorbeeld maar aan de telescoop die een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan de ontwikkeling van de mechanica en de kennis van het heelal. Denk ook eens aan de microscoop die zoveel heeft betekend voor de biologen en medici en veel heeft bijgedragen tot de ontrafeling van de structuur van de materie. Hetzelfde kan gezegd worden van de spectrograaf en de fotocamera. Optische verschijnselen hebben ook de basis gevormd voor de ontwikkeling van de relativiteitstheorie en de quantummechanica. Het was en is op grond van deze historie te verwachten dat lasers een belangrijke rol zouden en zullen gaan spelen in de wetenschap en techniek. Om die reden behoort iedere universiteit en hogeschool een belangrijk gedeelte van zijn onderwijs- en onderzoeksprogramma in te vullen met optica en laserfysica en ook veel bedrijven zullen hun poorten moeten openen voor de nieuwe ontwikkelingen in de optica.

Mijn voordracht valt uiteen in drie delen. In het eerste gedeelte vertel ik U iets over de werking van de laser en wat de belangrijkste eigenschappen van een laser zijn. In het tweede gedeelte wil ik U een overzicht geven van de belangrijkste lasertypen uit het oogpunt van toepassingen. In het derde gedeelte zal ik een overzicht geven van de belangrijkste toepassingsgebieden van lasers.

1. DE WERKING VAN EEN LASER

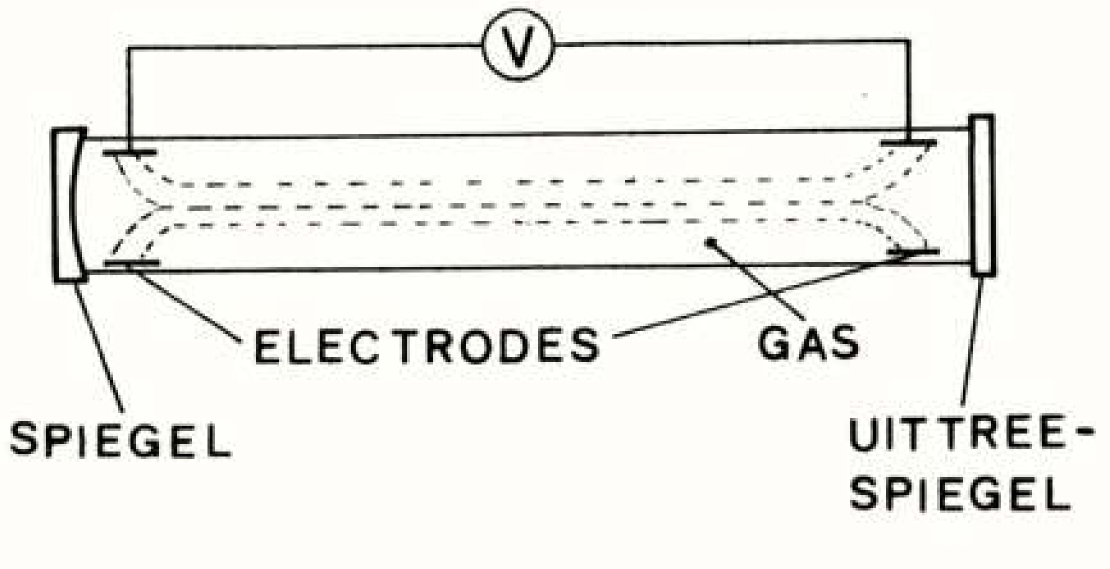


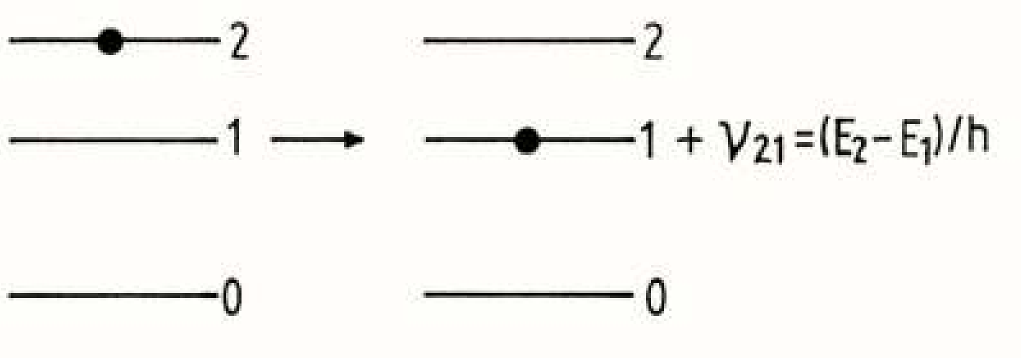
Fig. 1

In afbeelding 1 is een schematische voorstelling te zien van een laser waarbij het actieve medium gasvormig is. We beschouwen het eenvoudige geval dat slechts één soprt moleculen of atomen aanwezig is. Dit molecuul heeft een aantal energieniveau's waarvan we behalve de grondtoestand nog twee aangeslagen niveaus's bekijken. De invloed van alle andere niveau's verwaarlozen we.

Als de gasontlading niet brandt zullen nagenoeg alle deeltjes zich in de grondtoestand c bevinden. De andere niveau's zullen een slechts kleine, door thermische effecten veroorzaakte, bezetting hebben. Zodra de gasontlading brandt zullen electronen, die energie kunnen winnen uit het elektrisch veld tussen de electrodes, botsen met de moleculen en met verlies van kinetische energie een aantal er van aanslaan d.w.z. naar niveau 1 of 2 brengen.

Nu kunnen de volgende processen optreden:

a. spontane emissie van licht

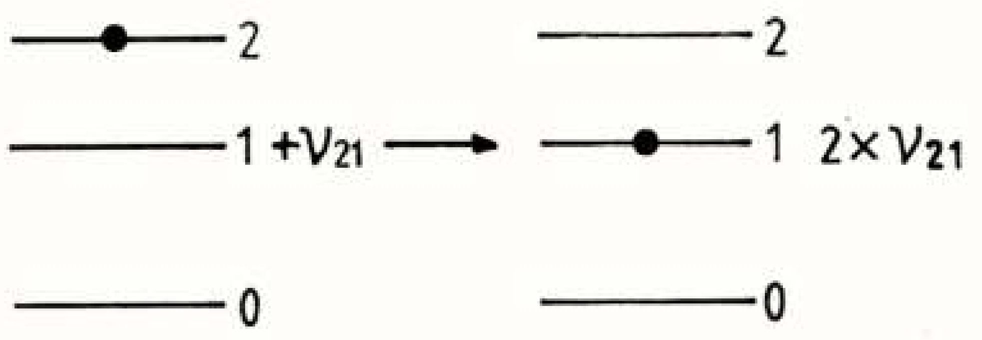


Indien een molecuul zich bevindt in toestand 2, kan het spontaan d.w.z. zonder inwerking van buitenaf, naar toestand 1 vervallen en tegelijkertijd een lichtquant uitzenden met een frequentie die gegeven wordt door het energieverschil tussen de niveau's 2 en 1. Het aantal moleculen dat per seconde vervalt door spontane emissie is natuurlijk evenredig met het aantal moleculen in niveau 2, N_2:

$N_2 . A_{21}$,

waarin A_{21} een evenredigheidsconstante is.

b. gestimuleerde emissie

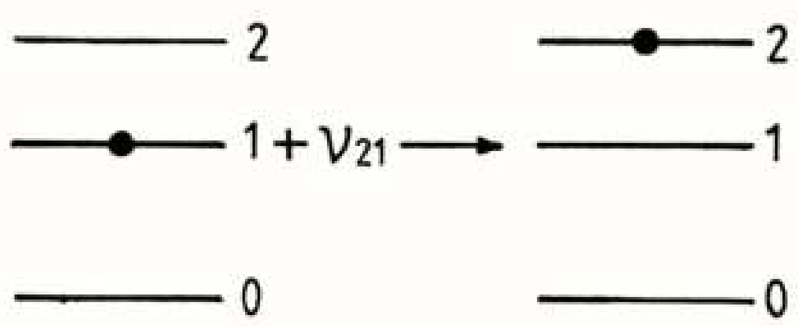


Indien een molecuul zich bevindt in toestand 2, kan het onder invloed van licht met frequentie ν_{21} gestimuleerd worden tot het uitzenden van een lichtquant met dezelfde frequentie ν_{21} en ook met dezelfde fase en voortplantingsrichting.
Het aantal moleculen dat per seconde vervalt door gestimuleerde emissie is natuurlijk weer evenredig met N_2 en bovendien met de stralingsdichtheid $\rho(\nu_{21})$ bij de frequentie ν_{21}:

$$N_2 . B_{21} . \rho(\nu_{21}),$$

waarin B_{21} een evenredigheidsconstante is.

c. (gestimuleerde) absorptie



Indien een molecuul zich bevindt in toestand 1, kan het licht met frequentie ν_{21} absorberen. Het molecuul maakt dan een overgang van toestand 1 naar toestand 2. Het aantal moleculen dat per seconde een quant absorbeert is evenredig met N_1, het aantal moleculen in toestand 1 en met de stralingsdichtheid $\rho(\nu_{21})$ bij de fequentie ν_{21}:

$$N_1 . B_{12} . \rho(\nu_{21}),$$

waarin B_{12} een evenredigheidsconstante is.

Veronderstel nu dat er een monochromatische bundel is die volgens de as van de laser loopt, dan wordt de toename van de intensiteit van de bundel gegeven door:

$$\Delta I_{(\nu_{21})} = (B_{21} N_2 - B_{12} N_1) . (I(\nu_{21})/c) . h\nu_{21} . \Delta z,$$

waarbij de bijdrage van de spontane emissie is verwaarloosd en voor de intensiteit geldt:
$I(\nu_{21}) = \rho(\nu_{21}).c$. Voor een eenvoudig molecuul met niet-ontaarde niveau's kan worden afgeleid:

$$B_{21} = B_{12},$$

zodat

$$\frac{1}{I(\nu_{21})} . \frac{dI(\nu_{21})}{dz} = (N_2 - N_1) . B_{21} . \frac{h\nu_{21}}{c}$$

In deze vergelijking ligt de laserwerking opgesloten. Als het lasermedium zodanig wordt geprepareerd dat $N_2 > N_1$ dan wordt de bundel versterkt. Deze toestand is een niet normale oftewel geïnverteerde toestand t.o.v. de normale waarbij over de niveau's een verdeling volgens Boltzmann is.
Dit eenvoudige stukje theorie is jarenlang niet voldoende geweest om een laser te bouwen. Deze theorie is al ontwikkeld rond 1920 door Einstein en zoals ik U al verteld heb, heeft het tot 1960 geduurd voor men in staat was de eerste laser te bouwen. Het idee om een laser te bouwen met gebruikmaking van een Fabry-Perot interferometer is pas ontstaan aan het eind van de vijftiger jaren door Basov, Prokhorov en Townes die daarvoor de Nobelprijs hebben gekregen.

Een Fabry-Perot interferometer bestaat uit twee vlakke of enigszins gekromde spiegels die zeer nauwkeurig t.o.v. elkaar evenwijdig moeten staan. In het algemeen is één van de spiegels een volledige reflector, terwijl de andere gedeeltelijk transparant is. Nu gebeurt het volgende:
Stel de gasontlading wordt ontstoken en we zijn in staat het medium actief te maken d.w.z. we zijn in staat N_2 groter te maken dan N_1. Er zal nu spontane emissie optreden. Dit spontaan uitgezonden licht zal alle richtingen uitgaan. Een gedeelte van dit licht gaat volgens de as van de interferometer. Dit licht wordt door beide spiegels gereflecteerd en blijft dus in de interferometer heen en weer lopen en wordt versterkt door het proces van gestimuleerde emissie. Weliswaar wordt bij één van de spiegels een gedeelte van het licht uitgekoppeld, maar als de versterkingsfaktor bij één rondgang in de interferometer groter is dan de transmissieverliezen, zal zich in de tijd een lichtbundel van grote sterkte kunnen opbouwen. Deze toename van lichtintensiteit gaat door tot er evenwicht is tussen de versterking, die verzadigt bij toenemende intensiteit, en de transmissieverliezen.
Belangrijke eigenschappen van de aldus gevormde bundel zijn:

a. een hoge lichtintensiteit. Het licht kan continu worden uitgezonden of in de vorm van pulsaties.

b. de bundel is nagenoeg evenwijdig en kan dus over grote afstanden getransporteerd worden. Bovendien kan de bundel dan op een heel klein oppervlak worden gefocusseerd hetgeen enorme vermogens dichtheden oplevert.

c. de frequentie van het licht is zeer nauwkeurig bepaald.

2. LASERTYPEN GESCHIKT VOOR TOEPASSINGEN

We hebben in het eerste gedeelte alleen gesproken over lasers die werken m.b.v. een gasontlading. Er zijn echter meerdere mogelijkheden om een inversie aan te brengen b.v. met een uitwendige lichtbron (flitsbuis) of een chemische reactie. Ook kunnen verschillende soorten medium gebruikt worden waar onder vaste stoffen, vloeistoffen gassen en halfgeleiders.
In het volgende overzicht staan de belangrijkste lasers genoemd uit het oogpunt van toepassingen

Type	Golflengte in µm	Vermogens continu	Vermogens gepulseerd
HeNe	0,6328	enkel 100mW	
$HeCd^+$	0,4416	50mW	
Ar^+	0,4880	enkele tientallen wats	
	0,5145		
Kr^+	0,647	1W	
Co	5 à 6	50W	
CO_2	10.6	10 - 10000W	1 J - 1 kJ
N_2	0,3371		10 mJ
Cr^{3+}	0,6943		100 J
Nd			1 kJ
eximeer	0,4 - 0,15		1 kJ
GaAs	0,85		
GaAlAs	0,9		
kleurstof	0,4 - 0,8		1 J

3. TOEPASSINGEN

Meettechniek

Voor het doen van metingen m.b.v. laserlicht heeft men i.h.a. voldoende aan een laagvermogen laser zoals een He-Ne-laser. Alleen voor lange afstandsmetingen (b.v. meten van de afstand naar de maan) heeft men hoogvermogen lasers nodig.
Een aantal toepassingen zijn:

- positioneren van onderdelen tijdens de fabricage. Vaak gaat dit samen met het gebruik van robots.
- uitlijnen. In b.v. de wegenbouw, de aanleg van tunnels en rioleringen en ook in laboratoria wordt de rechtlijnige voortplanting van licht gebruikt voor uitlijnen.
- barcode-scanning. Omdat de verwerkingssnelheid een rol speelt hebben lasers hier voordelen.
- afstandsmeting. Voor het meten van korte afstanden maakt men gebruik van de cohaerentie eigenschappen van laserlicht. De golflengte van het licht wordt dan gebruikt bij de afstandsbepaling. Voor het meten van lange afstanden meet men de tijd die verstrijkt tussen het wegzenden van een laserpuls en het terugkomen van de reflecties. Deze tijd is een maat voor de afstand. Vaak zijn zeer korte pulsen (ps -gebied) van hoog vermogen nodig.
- concentratiemetingen van b.v. verontreinigingen in de lucht.
- temperatuur- en drukmetingen. Soms kunnen daarvoor speciale optische sensoren worden gebruikt die in een optisch geïntegreerd circuit zijn aangebracht.
- snelheidsmetingen m.b.v. het Doppler effect.
- interferometrie. De laser kan gebruikt worden bij gewone interferometrie zoals b.v. in een Michelson of Jamin interferometer. Interferometrie m.b.v. hologrammen vindt ook veel toepassing. Men kan de plaatsafhankelijke vervorming meten t.g.v. een uitwendige verandering (b.v. druk- of temp.verandering)

Materiaalbewerking

Voor het doen van materiaalbewerkingen heeft men i.h.a. hoogvermogen lasers nodig. De meest gebruikte typen van lasers zijn: Nd-YAG van enkele honderden watts; CO_2-lasers die gepulseerd meerdere honderden Joules kunnen leveren en continu een vermogen van enkele kwatts kunnen produceren; robijnlasers die gepulseerd ook enige honderden Joules kunnen leveren.
Een aantal toepassingen zijn:

- boren, lassen en snijden van metalen, kunststoffen en andere materialen. Enkele voordelen van de laser in dit soort bewerkingen zijn: de locale verhitting die men aanbrengt, er is geen mechanisch contact

tussen werkstuk en werktuig en het werktuig is één-dimensionaal zodat willekeurige vormen kunnen worden gesneden.

- harden van oppervlaktelagen
- legeren van oppervlaktelagen
- graveren van en markeringen aanbrengen in oppervlaktelagen.

Plasma generatie en -verhitting

Omdat lasers zeer goed focusseerbaar zijn kan men erg hoge energiedichtheden bereiken. Bij dergelijk hoge energiedichtheden kunnen doorslagen in gassen en natuurlijk ook vloeistoffen en vaste stoffen optreden. Men hoopt m.b.v. lasers een aldus gevormd plasma in b.v. deuterium en tritium tot een zo hoge temperatuur te kunnen brengen dat kernfusie optreedt. Dit is een aanzienlijk schoner alternatief voor de opwekking van energie dan de kernsplitsing. Hiervoor zijn zeer hoge energetische lasers nodig die een gepulseerde energie afgeven van enige honderden kJoules. De in aanmerking komende lasertypen zijn: CO_2 en eximeerlasers.

Signaaloverdracht

Ook voor deze toepassingen zijn i.h.a. geen hoogvermogen lasers nodig. Wel is een speciale golflengte nodig ($\lambda \sim 1,5\ \mu m$) om over lange afstanden te kunnen communiceren.

Enkele toepassingen zijn:

- lange en korte afstandscommunicatie. Omdat de frequentie van het licht hoog is kan men veel voordeel hebben van de grote bruikbare bandbreedte van de signalen. Een ander voorbeeld is dat het transmissiemedium van licht glasfiber is i.p.v. koper.
- data overbrengen naar storingsgevoelige apparatuur als b.v. een computer.
- optical recording voor zowel het in- als uitlezen van informatie. De beeldplaat en de compactdisc zijn hiervoor de grote voorbeelden.
- geïntegreerde optica. Zowel voor de communicatie als voor de optische dataverwerking kan verwacht worden dat geïntegreerde optische systemen een rol gaan spelen.
- beeldbewerking.

Medische toepassingen

Enkele toepassingen zijn:

- oogoperaties. Voor netvliescoagulaties en het verwijderen van tumoren uit het oog wordt van de Ar^+-laser gebruik gemaakt. Deze heeft een goede doordringing in kleurloos weefsel.
- het maken van incisies: vooral in bloedrijke organen als b.v. de lever heeft het maken van sneden m.b.v. een CO_2-laser voordelen omdat de wond direct wordt dichtgeschroeid. Ook het genezingsproces van de wond verloopt sneller omdat minder weefsel beschadigd wordt.
- behandeling van wijnvlekken. Hiervoor worden Ar^+- en Dye-lasers gebruikt.
- tumorbehandeling.

Chemische toepassingen

Enkele toepassingen zijn:

- het selectief op gang brengen of onderhouden van chemische reacties.
- isotopenseparatie.

Wetenschappelijke toepassingen

Uit het grote aantal wetenschappelijke toepassingen volgen hier enkele

- spectroscopie. Door gebruik te maken van gepulseerde lasers kan het tijdsverloop van bepaalde processen en overgangen worden bestudeerd. Door van bepaalde technieken gebruik te maken kan men Doppler-vrij en dus met zeer hoge resolutie meten.
- temperatuur en dichtheidsbepaling in plasma's.
- gestimuleerde Ramanspectroscopie.

Voordracht gehouden tijdens de 338e werkvergadering.

DE FIBER OPTISCHE GYROSCOOP

Dr. L.J. van Ruyven
Philips Usfa B.V., Meerenakkerweg 1, 5600 MD Eindhoven

Een recente ontwikkeling in de fiber optische sensoren is de fiber-optische gyroscoop.
Een overzicht van de werking en eigenschappen van een "All Fiber" uitvoering worden besproken.

INLEIDING

De techniek van de tachtiger jaren zal gekenmerkt worden door een overgang van de electromechanica naar de electro-optica. Hoe langer hoe meer systemen maken van de specifieke eigenschappen van het licht gebruik, zoals informatie transport via neutrale deeltjes (fotonen), het parallel verwerken van informatie en het simpele feit dat twee elkaar snijdende lichtstralen geen "kortsluiting" maken.

Een bekend voorbeeld van zo een electro-optisch systeem is de Compact Disc waarbij de aan slijtage onderhevige mechanische informatieopname vanaf de plaat is vervangen door een "lichtpen". De lichtpen bestaat uit een halfgeleider-laser wier lichtbundel via buigings-begrensde optiek wordt afgebeeld op de informatiedragende laag in een lichtvlekje ter grootte van een halve golflengte (0,4 micron). Naast de funktie van lichtbron wordt via een samenstel van fotodiodes nog een aantal andere sensorfunkties verricht; detectie van het audiosignaal, spoor-volg- en focuspositiemeting, en dit gebeurt allemaal in een cylindertje van minder dan 5 cm lengte en een gewicht van 8 gram.

We moeten denken dat we nog slechts aan het begin van deze verschuivingen staan want een andere doorbraak op dit gebied is de uitvinding van de glasfiber, een dunne lichtgeleider waarin het licht bijna verliesvrij wordt overgebracht. Naast zijn funktie in de telecommunicatie wordt de fiber in toenemende mate ook gebruikt als optische sensor. Een optische sensor is een inrichting die de te meten parameter, bijvoorbeeld de temperatuur, omzet in een verandering van de eigenschappen van het getransporteerde licht. Dit kan zijn een verandering in intensiteit, een verandering in de golflengte of een verandering in de fase van het licht. Deze verandering in het licht kan dan omgezet worden in electriciteit met een detector of verder als licht verwerkt worden. Het is interessant op te merken dat de ontdekking van de sensoreigen-schappen van de glasfiber veelal voortgekomen zijn uit oorzaken van slecht fibergedrag gezien als communicatiefiber. Men eist immers van een goede communicatiefiber dat temperatuur, druk, magnetisch veld enz. een geringe invloed op de informatiestroom hebben, terwijl een goede sensor juist sterk moet reageren op de te meten grootheid.

Een heel bijzondere optische sensor is de hoeksnelheidsmeter ook wel fiberoptische gyroscoop genoemd (F.O.G.). De eerste sectie beschrijft in welke zin de funktie van een hoek-snelheidsmeter als gyroscoop kan worden geinterpreteerd. De tweede sectie verklaart de werking van de optische gyroscoop, en de derde sectie de speciale eigenschappen en een all fiber uitvoeringsvorm van de F.O.G.

DE GYROSCOOP

Een gyroscoop, in de traditionele zin van het woord, is een instrument bestaande uit een om een vrij beweeg-lijke as draaiende massa, meestal gebruikt voor stabilisatie. De gyros-coop als sensor vindt men terug in

bijvoorbeeld het gyrokompas welks werking berust op het beginsel dat de as van een snel draaiende tol zich richt naar de stand van de aardas. In het algemeen kan men stellen dat voor navigeren de stand van het voertuig ten opzichte van een referentiekader bekend moet zijn om de stuurkracht in de juiste richting te laten werken. Dit kan gebeuren door alle hoekverdraaiingen ten opzichte van de beginstand te meten met een hoeksnelheidsmeter en het resultaat te integreren.

Sinds de ontdekking van de tolgyroscoop zijn ontelbare variaties, op dit principe van de bewegende massa bedacht. Zo kunt u zelf een proef nemen door tegen een wijnglas te tikken en het vervolgens rond te draaien, afhankelijk van de draaisnelheid zal de toon veranderen doordat de Corioluskracht op de van binnen naar buiten bewegende massa werkt. Op dit principe berust de werking van de "Hemispherical Resonator Gyro". Het Charles Stark Draper Laboratory heeft alle mogelijkheden nog eens op een rij gezet in een overzichtsartikel (Ragan, R.R. 1984). Een bepaalde klasse van de gyroscopen vormt de zgn. strapdown gyroscoop, deze zijn niet vrijbeweeglijk opgehangen zoals de traditionele tolgyroscoop die mechanisch vrij kwetsbaar is.

In voertuigen die aan grote versnellingen onderhevig zijn zoals ruimteschepen ontstaan problemen met gyroscopen gebruikmakend van bewegende massa. Men prefereert hier systemen zonder bewegende delen. Een oplossing zou kunnen zijn de "Nuclear gyro" welke gebruik maakt van de precessie van atomen. In de praktijk komt het erop neer dat men een complete magnetische resonantiemeting uitvoert. Voertuigen die aan grote versnellingen onderhevig zijn, vereisen navigatiesensoren die weinig wegen en compact gebouwd kunnen worden, hetgeen niet gezegd kan worden van de Nuclear gyro. Het antwoord is de F.O.G.

DE OPTISCHE GYROSCOOP

In 1880 deed Albert Abraham Michelson een opmerkelijk experiment waarvoor hij in 1907 de Nobelprijs ontving. In die tijd was het gebruikelijk de voortplanting van het licht te beschrijven in termen van een gepostuleerde "lichtaether" welke stil stond t.o.v. het heelal. Michelson wilde nu de absolute snelheid waarmee zijn laboratorium in Chicago door de stilstaande lichtaether bewoog, precies meten. Het experiment zou altijd een positief resultaat moeten geven, aangenomen dat de lichtaether werkelijk bestaat, omdat tengevolge van de aardrotatie om zijn as, de uitkomst Noord-Zuid anders moest uitvallen dan de Oost-West uitkomst. Michelson bouwde

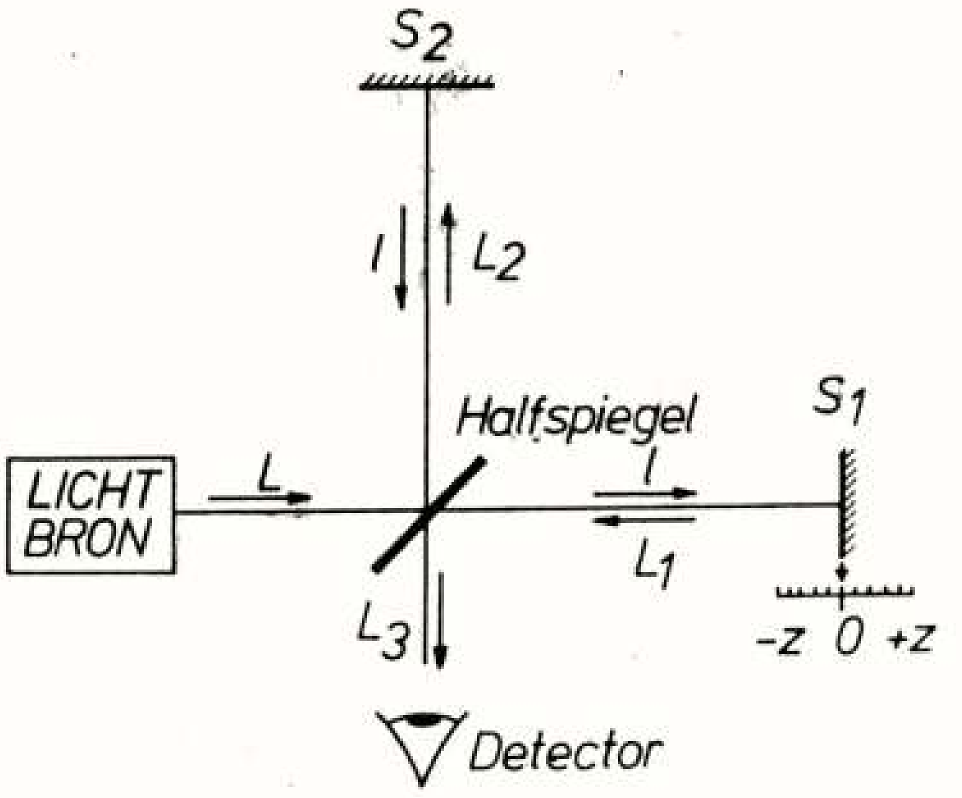


Fig. 1: MICHELSON interferometer. Met de verplaatsbare Spiegel S_1 kan de coherentielengte bepaald worden.

daartoe de in Fig. 1 afgebeelde interferometer. De lichtbundel L wordt door de halfspiegel gesplitst in twee gelijke delen L_1 en L_2 die loodrecht op elkaar staan. Na elk een afstand l afgelegd te hebben, keren zij terug door de spiegels S_1 en S_2 en worden weer samengevoegd tot de bundel L_3, waarvan de intensiteit gedetecteerd kan worden. Omdat beide benen een gelijke lengte l hebben treedt alleen dan constructieve interferentie op en wordt een maximale intensiteit waargenomen, als ook de lichtsnelheid in beide richtingen gelijk is.
Als er nu een lichtsnelheidsverschil is in een van de beide richtingen, tengevolge van de draaiing der aarde, kan men deze meten door de fase in een der benen bij te stellen met de positie Z van de spiegel S. Michelson vond echter dat de lichtsnelheid in elke richting onafhankelijk is van de beweging van de aarde, de eerste aanwijzing voor de invariantie van de lichtsnelheid; spiegel S_1 blijft steeds in positie Z = o. Verschuift men nu echter S_2, dan zal de intensiteit afhankelijk van de positie Z en de golflengte λ_0 toe en afnemen. Wanneer we Z van nul af monotoon laten toenemen zullen de maxima steeds minder intensiteit vertonen en de minima in intensiteit toenemen totdat het gehele effect is verdwenen. De afstand Z_c die correspondeert met 1/e voor de intensiteit van het effect heet de coherentielengte. De coherentielengte is een eigenschap van de lichtbron en heeft de fysische betekenis van een golftreinlengte. Interferentie is alleen mogelijk als het wegverschil in de orde van de coherentielengte is. De coherentielengte hangt samen met de spectrale zuiverheid van de lichtbron. Het is ons thans gelukt in een externe trilholte met een ensemble van 5 halfgeleiderlasers een bron te maken met een lijnbreedte kleiner dan 7.5 x 10^{-5} angström (Rediker R.H., 1985) en een coherentielengte van vele kilometers. Voor een CO2 laser is een dergelijke smalle lijnbreedte heel gewoon. We zullen in de rest van het betoog zien dat de coherentielèngte soms ook te lang kan zijn voor het optimale effect.

In 1913 publiceerde G. Sagnac een bijdrage waarbij het experiment van Fig. 2 behoort. De opstelling is een modificatie van de Michelson interferometer waarbij het licht gesplitst wordt in dė bundels L_1 en L_2 welke in tegengestelde richtingen hetzelfde rondlopende been van de interferometer doorlopen. Het spreekt vanzelf dat de detector steeds constructieve interferentie waarneemt, tenminste wanneer het systeem zich in rust bevindt. Wanneer de gehele interferometer inclusief lichtbron en detector rondgedraaid wordt met een

$$2\phi_S = \frac{4\pi l^2 \Omega}{\lambda_0 c}$$

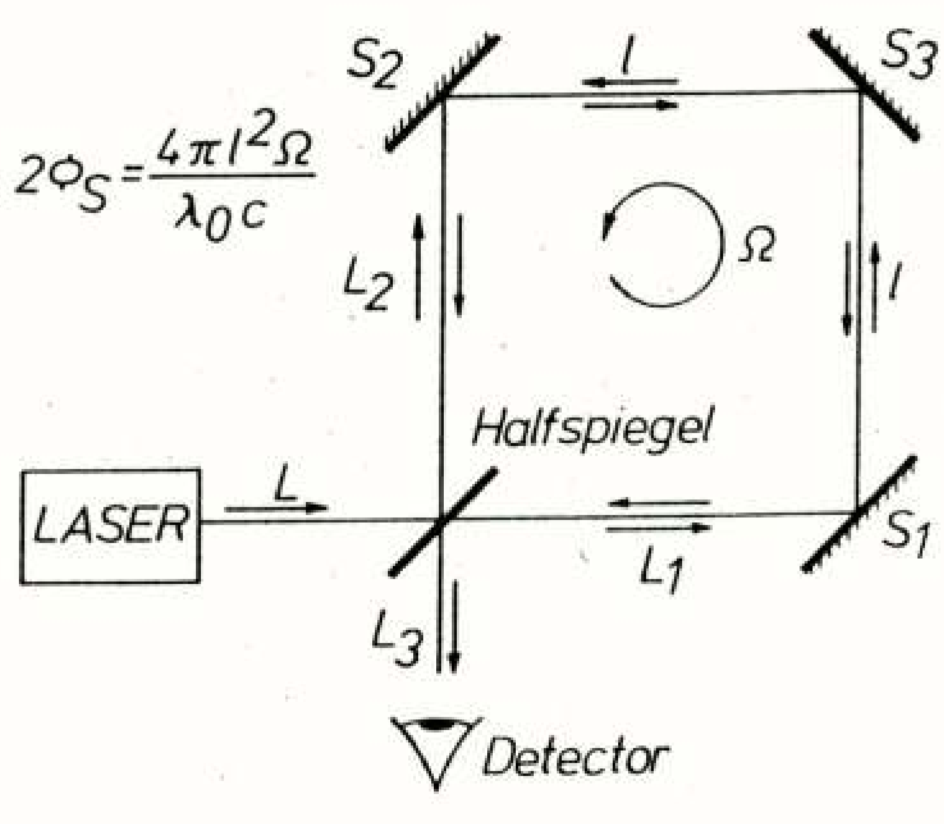


Fig. 2: Sagnac interferometer. Door het gebruik van een halfspiegel worden twee tegen elkaar indraaiende bundels verkregen.

hoeksnelheid van Ω radialen per seconde wordt een faseverschuiving van $2\phi_S$ bij de detector waargenomen welke gelijk is aan

waarin l de lengte tussen de spiegels is, λ_0 de golflengte van het gebruikte licht in vacuum en c de lichtsnelheid in vacuum. Ofschoon in Fig. 2 als lichtbron een laser is weergegeven deed Sagnac zijn experiment met de indigolijn van een kwiklamp. De beenlengte l was ongeveer 30 cm en bij een hoeksnelheid van 4π rad/sec kon hij juist een fase verschuiving meten (Sagnac G., 1914). Zowel theoretisch als experimenteel kan men laten zien dat de faseverschuiving niet afhangt van:

1. de vorm van het gekozen pad doch alleen de grootte van het omsloten oppervlak telt
2. de plaats van het draaipunt
3. de brekingsindex van het gekozen medium in het meebewegende optische pad.

Fig. 3 laat nu zien hoe Ezekiel (Davis J.L., 1981) deze eigenschappen uitbuitte door inplaats van een spiegelsysteem een klos optische fiber met N windingen te nemen. De faseverschuivingen wordt nu:

$$2\phi_S = \frac{8\pi^2 R^2 N \Omega}{\lambda_0 c}$$

EEN OPTISCHE GLASVEZEL

De optische glasfiber is een dunne lichtgeleider waarin het licht bijna verliesvrij wordt getransporteerd. Deze glasfibers zijn ontwikkeld ten behoeve van de optische communicatie, hetgeen betekent dat de eigenschappen zijn geoptimaliseerd voor ongestoord digitaal data transport en dus ongevoelig zijn voor externe parameters zoals temperatuur, druk, magneetveld enz. In de praktijk is het niet mogelijk de fiber geheel ongevoelig te maken voor externe parameters en er bestaan dan ook vele fibersensoren die alle berusten op een liefst selectieve gevoeligheid van een fiber. De te meten grootheid kan op drie manieren invloed uitoefenen op de eigenschappen van het door de fiber getransporteerde licht. In multimode fibers alleen op de intensiteit, in ronde monomodefibers op de fase en in onronde monomodefibers (zgn polarisatiehoudende fiber) op de polarisatietoestand.

In principe moet de fiber welke gebruikt wordt, gelijk de communicatie fiber, ongevoelig zijn voor al deze stoorinvloeden. We zullen echter zien dat het soms nuttig kan zijn om een geprogrammeerd foutsignaal te introduceren om de meting te vergemakkeljken en anderzijds dat de

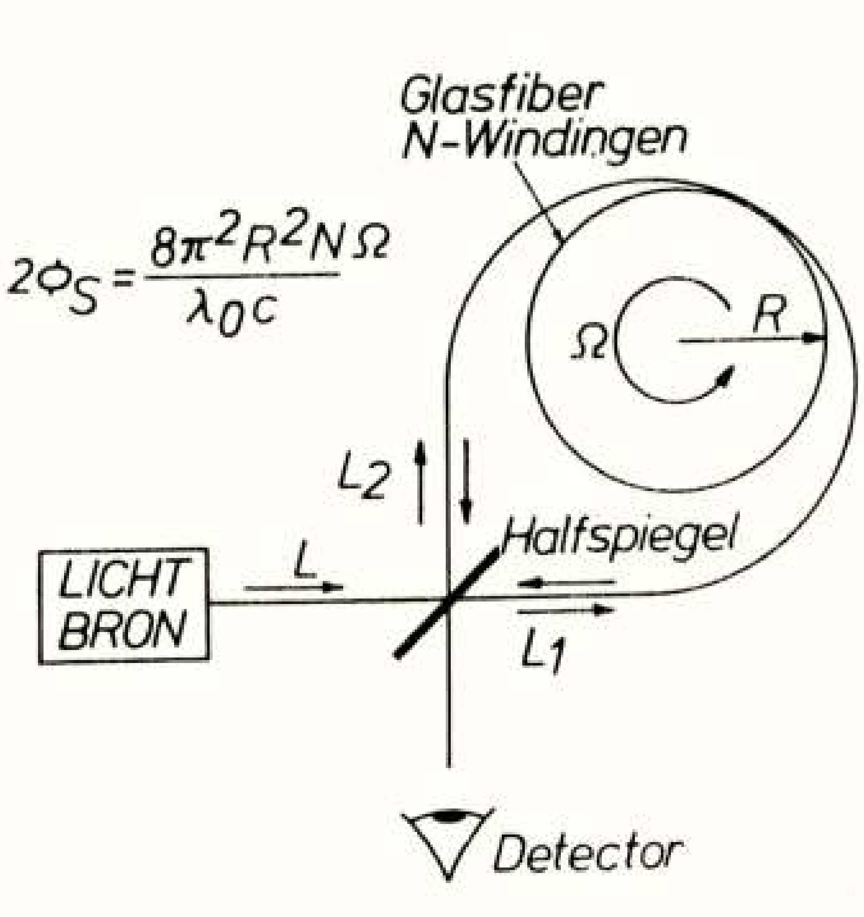


Fig. 3: Fiber-optische Sagnac interferometer. Door de lage demping in de glasfiber kan een groot aantal windingen gebruikt worden waardoor rotatiesnelheden tot 0,01°/ uur gemeten kunnen worden.

meest voor de FOG geschikte fiber (onronde monomode) helaas een sterke temperatuurafhankelijkheid heeft.

DE HALFSPIEGEL

Wanneer een stevige uitvoering van de FOG verlangd wordt die bestand is tegen grote versnellingen zowel in de zin van schokken en trillingen als de centrifugale krachten die optreden bij hoge hoeksnelheden, doet men er verstandig aan de halfspiegel te vervangen door haar fiber-optische analogon; de fiber-fiberkoppeling.

Twee fibers die gedeeltelijk van hun mantel ontdaan zijn worden over een zekere afstand met elkaar versmolten. De zo ontstane mechanisch sterke constructie koppelt licht van de ene fiber in de andere doordat de optische flux uit de ene kern de andere binnendringt en -de gewenste- minus 3dB koppeling komt zo tot stand. De stabiliteit t.o.v. een traditionele halfspiegel en inkoppel-lenzenstelsel is een enorm voordeel. Tegenover dit voordeel staat echter een nadeel, de twee uitgangen van deze koppeling zijn 90° uit fase, dit is bekend als het kwadratuurprobleem. Waneer we zondermeer de rondlopende bundels via fiber-fiber koppelingen combineren krijgen we dat voor kleine Sagnacfaseverschuivingen de helling van de cosinus functie nul is en dus ook de gevoeligheid.

$$I_{output} = 1/2\ I_{input} \left(1 + \cos 2\phi_s\right)$$

Een kunstmatige fasesprong van 90°, alleen werkzaam in één der bundels, brengt de interferometer output juist op de nuldoorgang van de cosfunctie en daarom in het gevoeligste punt voor de kleinere Sagnac hoeken, terwijl bovendien de output in eerste instantie als lineair benaderd kan worden. Een asymmetrische fasesprong kan gerealiseerd worden ofwel direct door een niet lineair element zoals een Faraday-cel ofwel door een tijdsafhankelijke reciproke verandering zoals een sinusvormige lengtemodulatie.

Fig. 4 geeft een voorbeeld van een "All-Fiber-Optic" gyroscoop met een lineaire output en fase detectie (Kim B.Y., 1984). Het licht van de laserdiode gaat via de fiber naar de fiberklos symbolisch weergegeven door één winding met een kleinere winding welke de fasemodulator voorstelt dit is de bundel die tegen de klok inloopt. Uit de klos wordt het licht door de fiber-fiberkoppelaar weer in de oorspronkelijke fiber teruggekoppeld. Vlak voor de laserdiode wordt het teruggaande licht met een tweede fiber-fiberkoppeling naar de fotodiode uitgekoppeld. Bovendien gaat het licht van de laserdiode via dezelfde fiber en de eerste fiber-fiberkoppeling naar de fasemodulator en dan in de

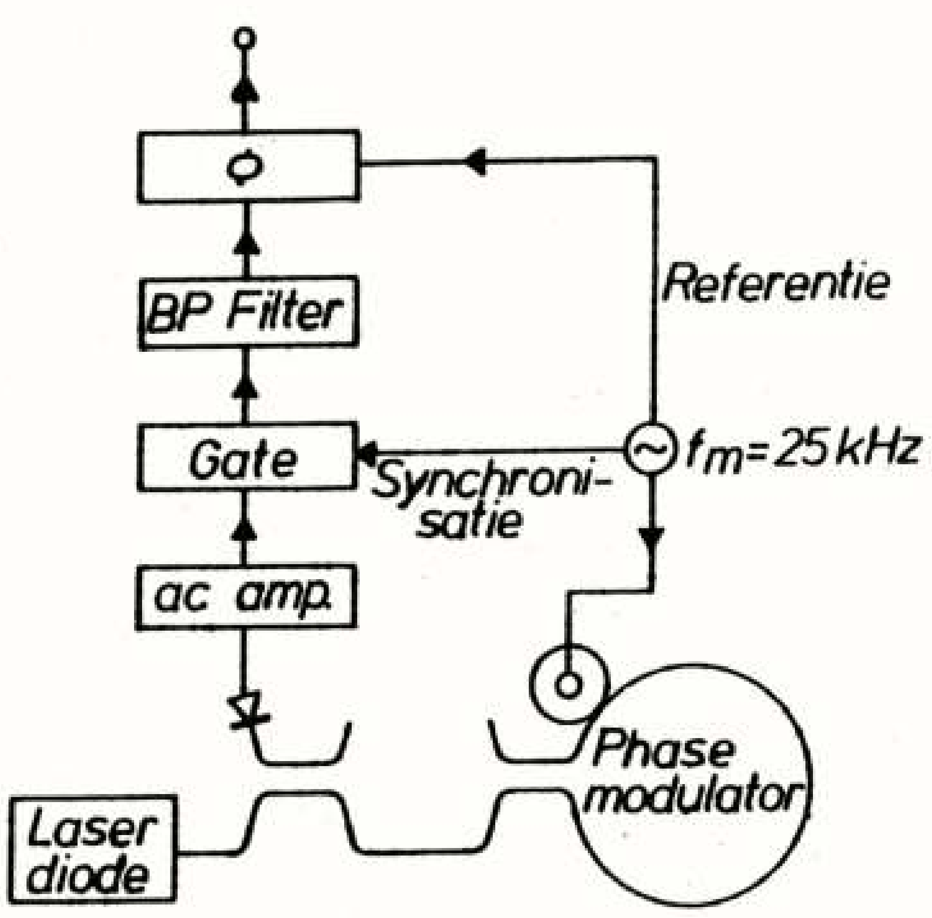


Fig. 4: Schematische opbouw van "All-Fiber-Optic" gyroscoop met een lineaire output en fase uitlezing.

fiberklos, dit is de bundel die met de klok meeloopt, vervolgens via de fiber terug en weer uitgekoppeld naar de fotodiode via de tweede fiber-fiberkoppeling. Dit is de weg van het licht.

De weg van de elektrische stroom is in figuur 4 voorgesteld door zwarte driehoekjes in de leidingen. De 25 kHz sinusvormige modulatiebron geeft zijn signaal aan de piezoelektrische fasemodulator, bestaande uit een cylindertje waaromheen een paar slagen fiber gewonden zijn. Doordat het piezoelektrische cylindertje inkrimpt en uitzet geeft dit een lengte verandering en dus een modulatie van de Sagnacverschuiving tussen de twee tegengesteldlopende bundels. Tevens zendt de modulatiebron een referentiesignaal naar de fasemeter ϕ en naar de gate. Anderzijds wordt het met de fotodiode gedetecteerde optische signaal via een versterker ook naar de gate gestuurd.

De detectorstroom bestaat uit de frequentie f_m en hogere harmonische gesuperponeerd op de Sagnacverschuiving. Uit de oneven harmonische van f_m kan met de fasemeter de hoeksnelheid voor kleine Sagnacverschuivingen nauwkeurig gemeten worden. Met het bandpassfilter (BP) wordt de eerste harmonisch geselecteerd en naar de fasemeter gestuurd, welke de fase meet t.o.v. de refentie. Deze electronische faseverschuiving kan gemeten worden met een digitale klok.

EIGENSCHAPPEN VAN DE "ALL-FIBER" OPTISCHE GYROSCOOP

Uit de principes waarop de F.O.G. berust, kan men zien dat alle lineaire fouten en onregelmatigheden tegen elkaar weg vallen, we moeten de ruisbron dan ook zoeken in de niet lineaire effecten zoals het Faraday effect en het Kerr effect. Maar ook temperatuur afhankelijkheid van bijvoorbeeld fiber-fiberkoppelingen spelen een rol. De beste resultaten worden bereikt met polarisatie vaste monomodefibers want alle toevallige koppelingen tussen modes zijn temperatuurafhanelijk. Een superstraler, een lichtbron van niet terug gekoppelde gestimuleerde emissie, blijkt een betere lichtbron dan de echte laser. Dit komt omdat Raleigh verstrooing in de polarisatievaste monomodefiber betekent een omkering van de snelheidsvector en dus een bijdrage tot het licht van de teruglopende bundel. De ideale bron heeft een breedspectrum met een coherentielengte lang genoeg om Sagnac inteferentie te geven maar zo kort dat alle teruggestrooide modi statistisch uitmiddelen.

De kwantumlimiet in gevoeligheid van F.O.G's ligt bij de "shotnoise" in de optische detector. De theoretische limiet in nauwkeurigheid ligt voor de F.O.G. beter dan elke andere gyroscoop dit wordt mede veroorzaakt door dat het aantal windingen nagenoeg onbeperkt kan opgevoerd worden. In de huidige stand van de techniek is in de praktijk de ringlasergyro, bestaande uit een driehoekige gaslaser en spiegels, de nauwkeurigste navigatiegyroscoop (Burns W.K., 1984).

REFERENTIES

BURNS, W.K.; Fiberoptic Gyroscopes; Laser Focus/Electro-Optics, (Februari 1984), p. 83.

DAVIS, J.L. and Ezekiel, S.; Closed-Loop, Low-Noise Fiber-Optic Rotation Sensor; Optics Letters; Vol. 6, (1981), p. 505.

KIM, B.Y. and Shaw, H.J.; All-Fiber-Optic Gyroscope with Lineair Scale Factor using Phase Detection; SPIE, Vol. 478, Fiber Optic and Laser Sensors II, (1984), p. 142.

RAGAN, R.R.; Inertial Technology for the Future; IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems; Vol. AES-20, No. 4, (1984), p. 414.

REDIKER, R.H., Anderson, K.K., Schloss, R.P. and Ruyven, L.J. van; High-Spectral-Purity Coherent-Array of Diode Lasers with Feedback in the Fourier Plane; Technical Digest, IOOC-ECOC, Vol. III, (1985), p. 89.

SAGNAC, G.; Journal de Physique Radium; 5th Ser, Vol. 4, (1914), p. 177.

Voordracht gehouden tijdens de 338e werkvergadering.

CO_2 LASER INTERSATELLITE COMMUNICATION

Dr. A. Hahne

European Space Research and Technology Center (ESTEC), Noordwijk

This paper describes the baseline design of an optical communication link between two satellites. As a baseline scenario, one satellite was assumed to be in a geosynchronous orbit (GEO) and the other one in a low earth orbit (LEO), resulting in distances up to 44 000 km to be bridged by the link. Two identical transceiver packages allow for data rates >1 Gbps at BER < 10E-8 in both directions.

INTRODUCTION

A number of the European Space Agency's future projects in space communications foresee the use of optical carriers as an effective means to establish data links between satellites. There is an increased need for inter-satellite links to enhance the capacity, coverage and connectivity of satellite communication systems which, traditionally, have relied on direct microwave links to earth. Optical techniques have the potential to provide the required high-rate data links with precisely pointable transmitter beams, involving only very low moving telescope masses for fast, wide-angle beam steering. Microwaves, on the other hand, would require large antenna dishes to achieve the same performance. By breaking fresh ground in the frequency/wavelength regime, optical systems avoid the problems of frequency allocation and congestion. Also, disturbances due to terrestrial radio frequency interference are virtually non existing in optical links.

BASELINE SCENARIO

To design against a realistic set of requirements, baseline scenarios being representative for potential applications have been identified. One scenario might be a link between a spacecraft in a low-earth orbit (between 250 and 800 km above the earth's surface) and a second spacecraft in a geosynchronous orbit. Examples for such a LEO-GEO-link are e. g. links between an earth observation platform or the space station and a data relay satellite. The second type of link (GEO-GEO) is employed between two geosynchronous satellites, separated by an angle between 60 and 120 deg., to provide full coverage for a low-earth orbit spacecraft or to serve worldwide communication purposes. Both link types are sketched in fig.1. In all cases, due to atmospheric restrictions, links to the ground have to be of conventional RF-type.

Apart from the larger distance in a GEO-GEO link and accordingly higher space losses, the LEO-GEO scenario is technically much more demanding and was therefore taken as the baseline for the transceiver design. Some important parameters are listed in table 1, whereas the communication requirements are given in table 2.

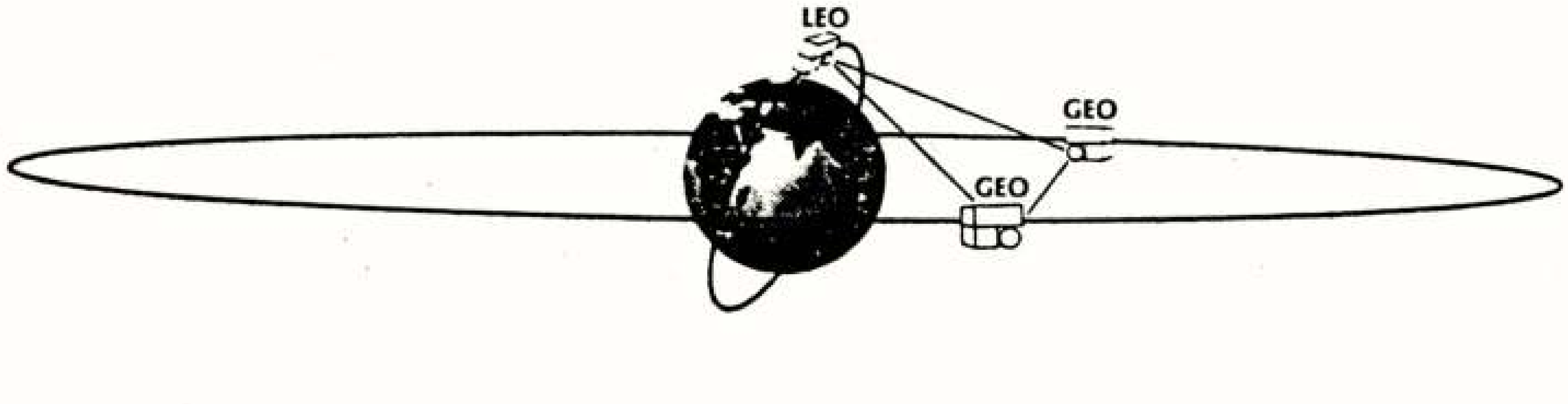


Fig. 1: Intersatellite link scenarios

	Model a GEO - GEO $\Theta = 120^0$	Model b LEO - GEO $H_L = 250$ km	Model b LEO - GEO $H_L = 800$ km
Link distance	$R = 73160$ km	$35620 \leq R \leq 43560$ km	$35070 \leq R \leq 45050$ km
Angular coverage			
at GEO	$0.2^0 \times 0.2^0$	$\delta = 18.0^0$ (cone)	$\delta = 19.6^0$ (cone)
at LEO	-	$\approx 2\pi$	$\approx 2\pi$
Max. angular tracking rates 1)			
at GEO	$\dot{\alpha}_G \simeq 0$	$\lvert\dot{\beta}_G\rvert \leq 233$ µrad/s	$\lvert\dot{\beta}_G\rvert \leq 228$ µrad/s
at LEO	-	$\lvert\dot{\beta}_L\rvert \leq 1476$ µrad/s	$\lvert\dot{\beta}_L\rvert \leq 1388$ µrad/s
Max. point ahead angle	$\varepsilon = 35$ µrad	$\varepsilon \leq 72$ µrad	$\varepsilon \leq 70$ µrad
Max. Doppler shift	$\Delta\nu_D \simeq 0$	$\lvert\Delta\nu_D\rvert \leq 732$ MHz	$\lvert\Delta\nu_D\rvert \leq 704$ MHz
Max. Doppler tracking rate	$\Delta\dot{\nu}_D \simeq 0$	$\lvert\Delta\dot{\nu}_D\rvert \leq 1.01$ MHz/s	$\lvert\Delta\dot{\nu}_D\rvert \leq 0.88$ MHz/s
Pointing uncertainty			
at GEO	$\pm 0.1^0$	$\pm 0.1^0$	$\pm 0.1^0$
at LEO	$\pm 0.15^0$	$\pm 0.15^0$	$\pm 0.15^0$

Table 1: Link parameters

Simultaneous two-way communications
Data rate >1 Gbit/s at BER <10E-8
Digital data format
Reliable operation up to max. ten years
Small size, low weight, minimum power consumption
Compatible with space environement (launch loads, thermal environment, radiation, etc.)
Adaptability to various mission needs
Growth potential to higher data rates

Table 2: Design requirements

System Design

A system tradeoff carried out as early as 1977 revealed that a system based on an externally modulated CO_2 -laser and a coherent detection scheme would be best suited for the abovementioned purposes. The two terminals are designed as transceivers, with common transmit and receive optics. Such a transceiver can be broken down into several subsystems:

o The Transmitter Subsystem with the transmitter laser, the external electrooptical modulator and its driver,

o the Receiver Subsystem with the detector, the local oscillator laser, and the receiver back end electronics,

o the Optical Subsystem, the main elements of which are the two telescopes acting as main antenna and intermediate beam expander an the polarization diplexer to separate transmit and receive channel,

o the Pointing, Acquisition, and Tracking Subsystem with the Coarse Pointing Assembly, the Fine Pointing Assembly, the Point Ahead Assembly, and the Optical Nutator,

o the Structure to support all these elements and to interface with the spacecraft.

Fig. 2 shows an exploded view of the transceiver package and fig. 3 is the according block diagram.

CRITICAL COMPONENTS

To date, research and development effort was concentrated on the design, development, and breadboarding of critical components. Some of them shall be featured in more detail :

Transmitter Laser

The transmitter laser, developed under German national funding, is a conventional continuous-wave (cw) laser with an optical output power between 6.2 and 10 W in the TEM00 mode at a wavelength of 10.6 micron. Four beryllium oxide discharge tubes, each 35 cm long, are optically put in series so that an overall cavity lenght of 1.3 m is achieved. The individual segments are terminated by zinc selenide Brewster windows. For thermal control purposes, the center between the four plasma tubes can, if it proves to be necessary, be equipped with a heat pipe. As the lifetime of the laser is mainly determined by the degradation of the gas mixture, an external gas reservoir permits the exchange of used-up gas mixture und thus extends the operational lifetime by a factor of 6 at least.

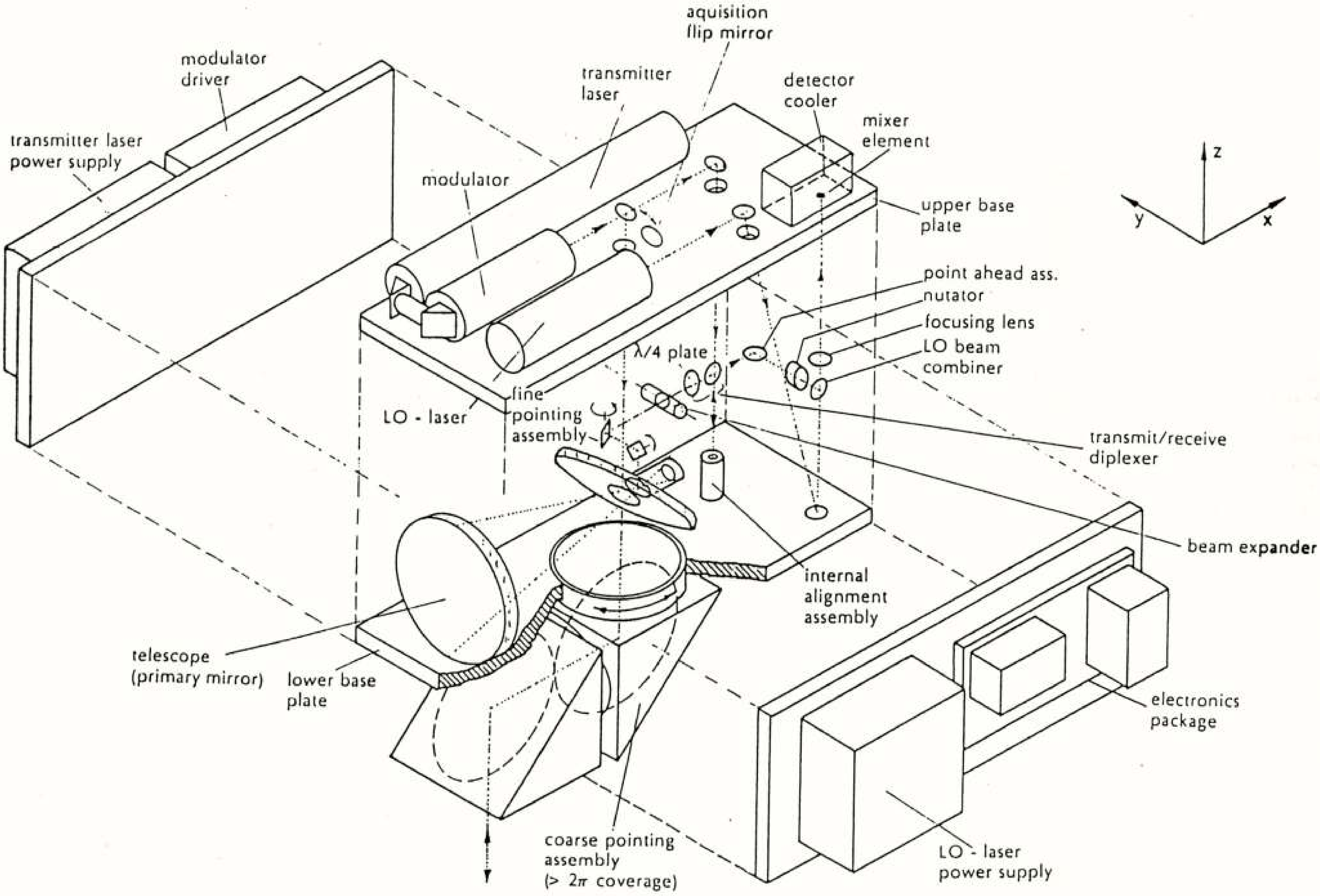


Fig. 2: Exploded view of the transceiver package

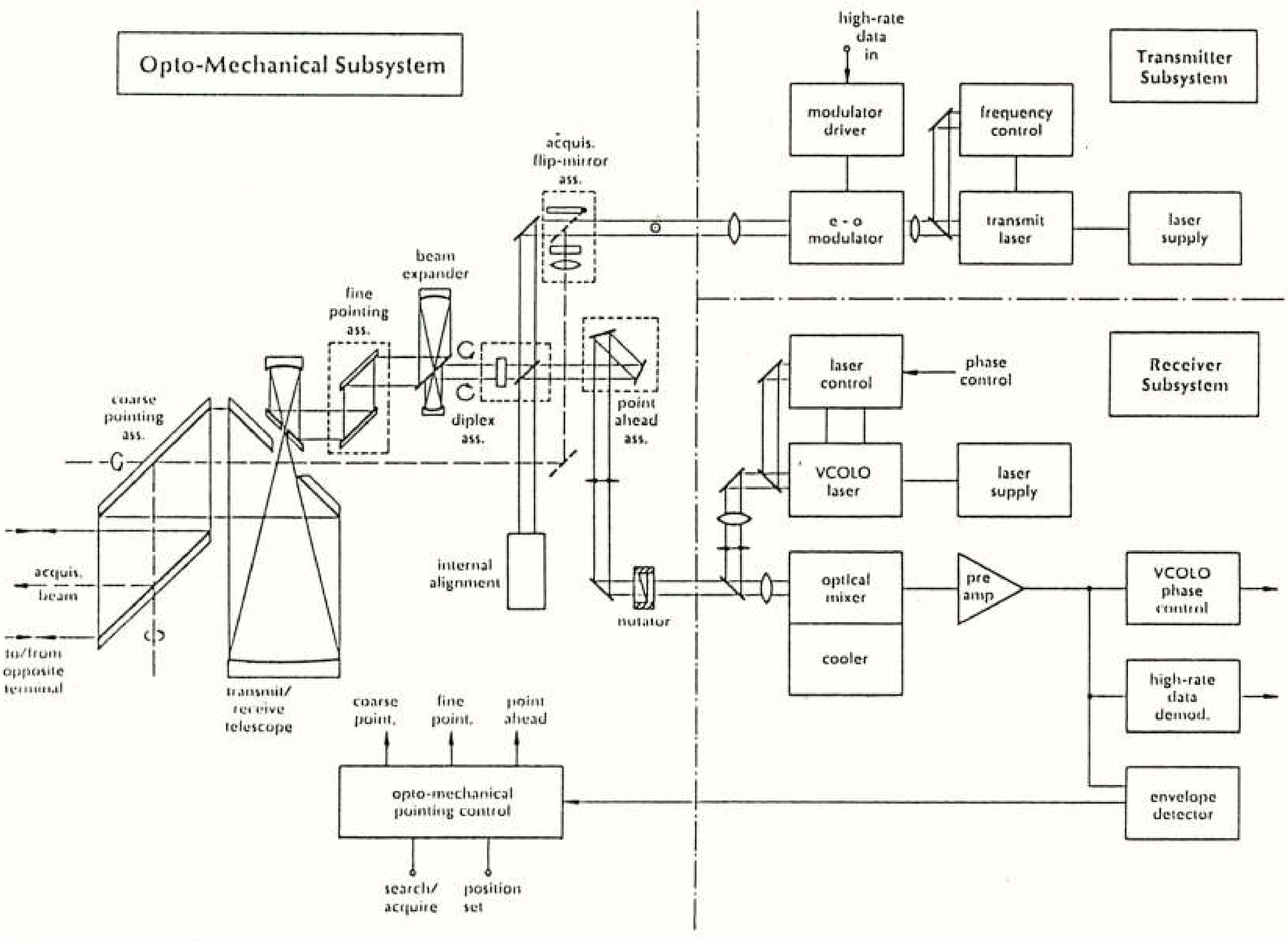


Fig. 3: Functional block diagram of the transceiver package

Modulator

Early in the programme it was realised that high-speed light modulation would be a key problem of the CO_2 transceiver design. This is mainly due to the poor efficiency that characterises the physically suitable modulation effects available at around 10 micron. This problem was approached by developing a travelling-wave light pipe modulator that uses electrooptic interaction in cadmium telluride to achieve modulation bandwidth in excess of 1 GHz. The device consists of several long, thin CdTe crystals arranged in cascade to form an oversized optical waveguide (fig. 4). The modulating electrical signal travels collinearly with the optical wave along the stripline electrodes. By proper choice of the dielectrics surrounding the crystals, the modulating electrical signal travels in synchronism with the optical wave, resulting in the desired large bandwidth operation.

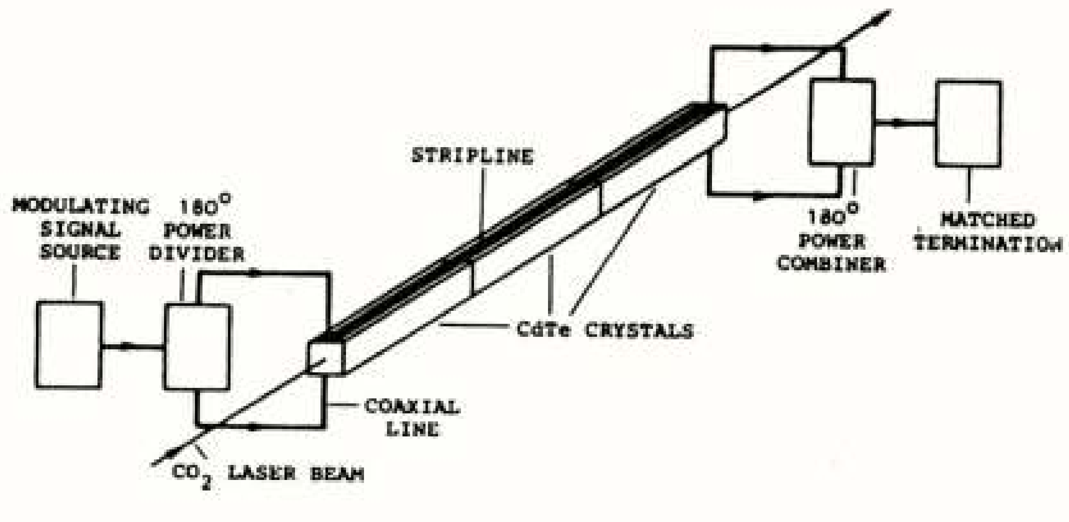


Fig. 4: Principle of the travelling-wave light modulator

Receiver

The receiver subsystem employs coherent optical homodyne detection. A photovoltaic HgCdTe photomixer, cooled to a temperture below 100 K by a mechanical Stirling cooler, acts as a phase detector for the optical phase locked loop (PLL). This loop detector together with an active loop filter and associated electronics produce a control voltage which drives the voltage controlled optical local oscillator so that its phase is synchronized to the instantaneous phase of the incoming signal wave. As can be seen from fig. 5, there are in fact two control loops, one for the compensation of fast frequency fluctuations, accomplished by an acoustooptical frequency shifter (AFS), and a second one acting on piezoelectrical stacks to change the resonator length of the LO-laser and, by this means, tune the frequency to account for Doppler shifts in the received signal.

Local oscillator laser

The local oscillator laser is realized as a low power/high pressure waveguide CO_2 laser. The beryllium oxide discharge tube is only 10 cm long, with an inner cross section of 1.5 mm (fig. 6). Line selection is done by a so-called "enhanced grating", the position of which is controled by springs and a piezostack. Three more piezostacks, supplied with the same voltage, control the position of the output coupler, which is connected to the waveguide tube by hard-sealed metal bellows. This mechanism provides the possibility to tune the frequency of the output beam over a range of $\pm$700 MHz around center frequency (fig. 7), as is necessary for the compensation of Doppler shifts (see tab. 1). Also for this laser, lifetime extension by gas exchange is foreseen.

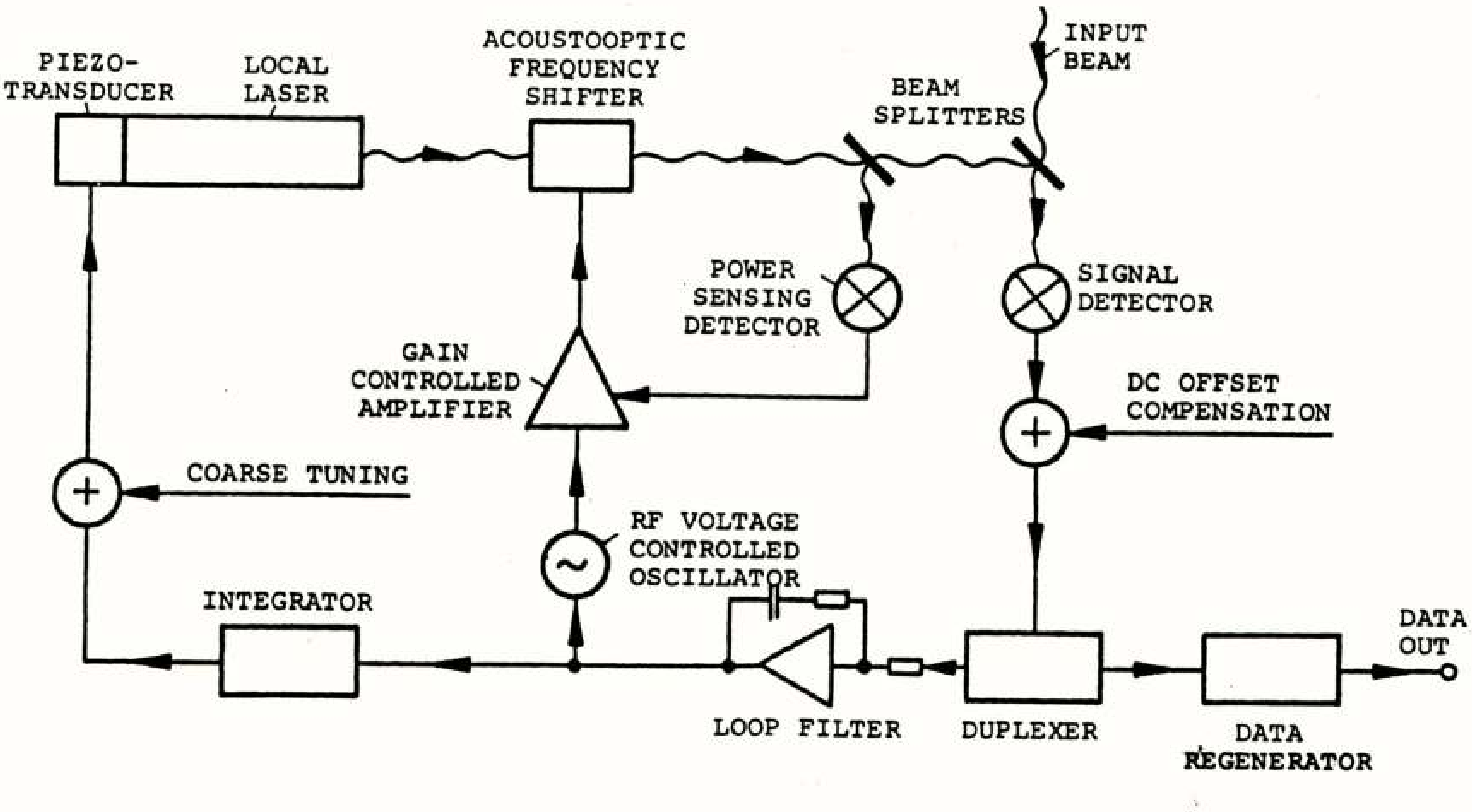


Fig. 5: Block diagram of the PLL

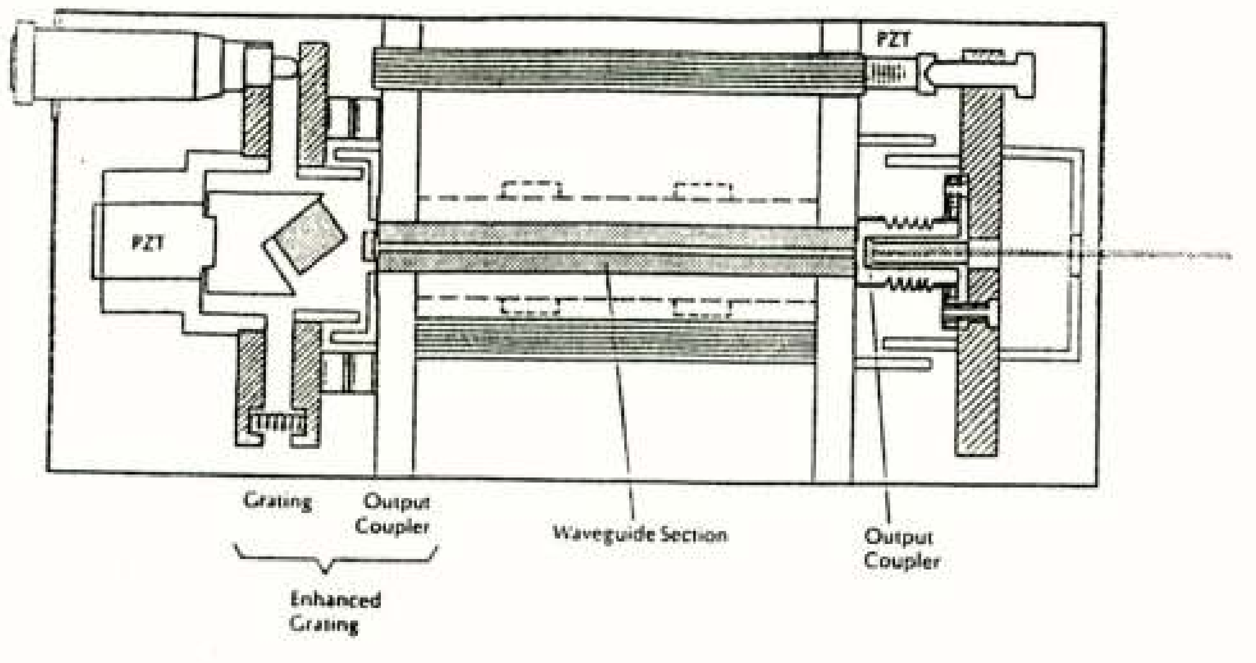


Fig. 6: Cross-section of local oscillator waveguide laser

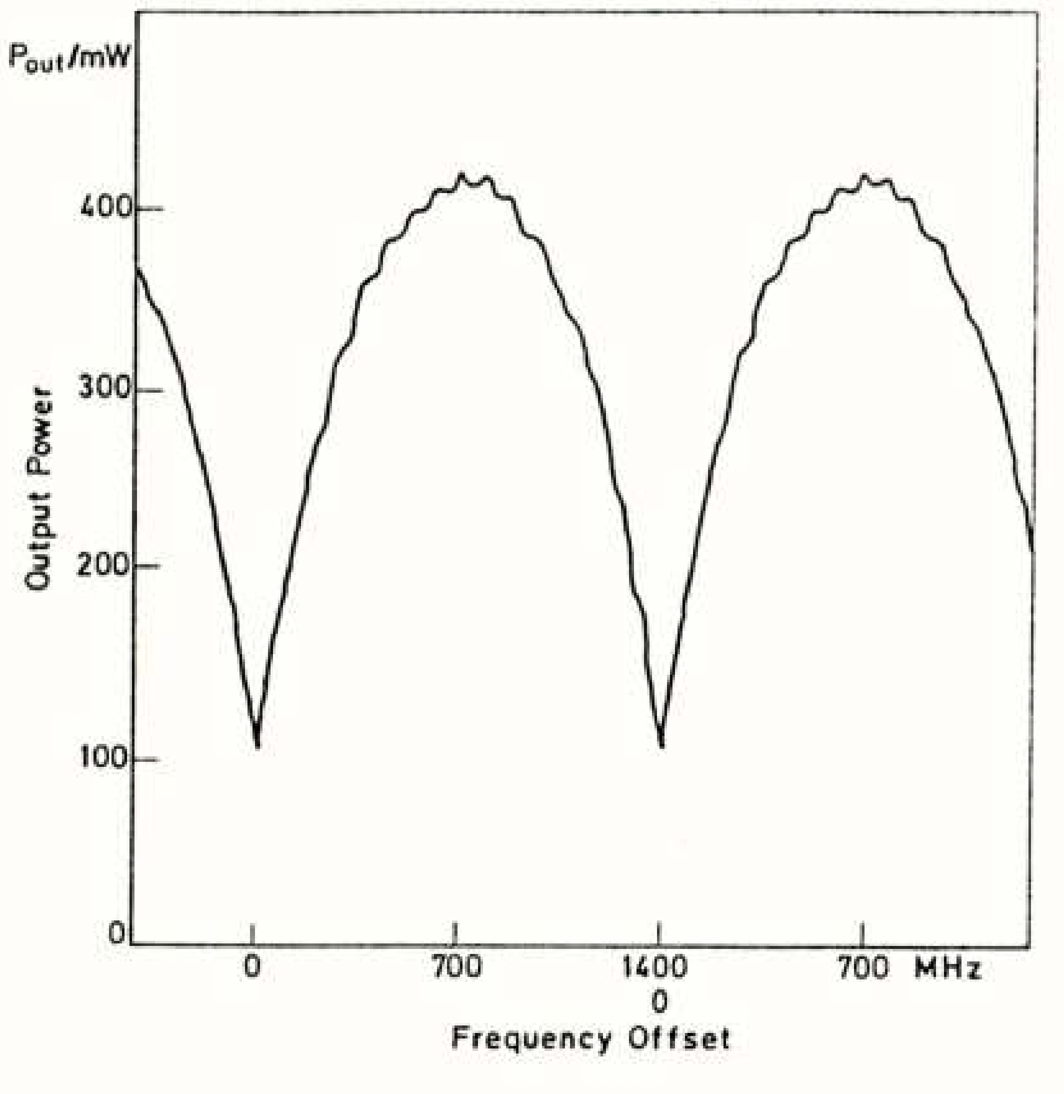


Fig. 7: Measured tunability range

Pointing, Acquisition, and Tracking Subsystem

Based on on-bord ephemeris data, both laser terminals have to acquire and track one another actively by means of their Pointing, Acquisition, and Tracking Subsystems (PAT). Accurate pointing of the very narrow beam is performed by a two-stage arrangement of movable optical components, common to transmit and receive channel. A Coarse Pointing Assembly (CPA) with two large mirrors (corresponding to the diameter of the main telescope) rotatable around two orthogonal axes is located in object space of the telescope. It provides a more than hemispherical coverage at comparatively low speed. For a GEO-GEO link, where only minor relative movements of the two spacecraft have to be considered, the CPA can be omitted.

The Fine Pointing Assembly (FPA) with two small mirrors tiltable around two orthogonal axes and actuated by piezostacks is located close to the exit pupil of the telescope and provides a high speed fine pointing capability with an accuracy better than $\pm$ 6 μrad (as measured in object space). A separate Point Ahead Assembly (PAA) consisting of two slowly movable mirrors compensates for the aberration of light due to the relative motion of the communicating terminals perpendicular to the line of sight.

The control signals for continuous spatial tracking are generated by means of the conical scan tracking technique. With this technique an optical nutator (a rotating transparent wedge with a very small wedge angle) generates a slight spatial modulation of the signal focused onto the detector. Amplitude and phase of the resulting modulated detector current are a measure for the pointing error angle.

Optics and Structure

Main elements of the diffraction limited optics are the two telescopes acting as main antenna and intermediate beam expander and the polarization diplexer separating transmit and receive channel. The telescopes are of confocal Gregorian type, with a total magnification factor of 51. In the present baseline, the diplexer consists of a wire grid polarizer and a Fresnel rhomb and shall provide a channel separation by 50 dB.

Apart from the fact that it has to withstand the launch loads and vibrations, the structure has to provide an accurate and stable mounting platform for all the optical and other elements with changing thermal conditions within the specified range causing no degradation of the optical performance. This is achieved by using a box-like structure made of Al honeycomb CFRE sandwich, which has a near zero thermal expansion coefficient in one direction. The Coarse Pointing Assembly is attached underneath the box, as can be seen at the wooden mockup (fig. 8).



Fig. 8: Wooden mockup of the transceiver package. On the top level, one can see from foreground to background: LO laser, modulator head, transmitter laser. The device attached underneath the package is the Coarse Pointing Assembly of the PAT.

FUTURE WORK

After most of the critical components have successfully undergone first performance tests, the play-together of the individual devices has now to be investigated. As a first step, a transmitter/receiver testbed is planned for the next future, where performances and functions being essential for the communication will be tested. The next step will then be a full scale laboratory breadboard, where functions like the pointing, acquisition, and tracking have to be included in the test programme. Parallel to this system breadboarding, activities to space-qualify the individual elements will continue.

For the year 1994, ESA plans to launch the European Data Relay Satellite, DRS. One candidate technology to be incorporated as an experimental payload is a CO_2 laser transceiver package. Studies to assess the suitability and maturity of different technological approaches are under way. Pending on the outcome of these studies and political and financial approval, it might be desirable to verify some essential functions of the transceiver package on a short duration flight before going on DRS.

ACKNOWLEDGMENT

The work described in this paper has been and is carried out by several industrial and university research teams at different locations. Apart from assisting ESA in the technical and programmatic management of the programme, BATTELLE e. V., Fankfurt (D) develops the transmit and LO lasers. Work on the receiver front end and the modulator development are done by the Institut fuer Nachrichtentechnik of the University of Vienna, whereas a prototype model of the modulator is presently built by SCHRACK AG, Vienna (A). The receiver back end electronics were developed at the Institut fuer Navigation of the University of Stuttgart (D). The PAT elements, finally, are built and tested by TELDIX GmbH, Heidelberg (D).

Voordracht gehouden tijdens de 338e werkvergadering.

LASERPRINTING

Ing. A.M. Butter
Burroughs B.V., Amstelveen

Laserprinting. This article discusses the application of lasers in printers for computerouput. The laserprinter is believed to be the most suitable type of printing-system, to create a superb quality of computer-generated output on paper.

INLEIDING

De produktie van "non-impact" printers voor de verzorging van computer-output heeft de afgelopen vijf jaar grote voortgang gemaakt en is nog voortdurend in ontwikkeling. Momenteel is er op de markt een grote verscheidenheid aan laserprinters beschikbaar. De afdruksnelheid van deze printers varieert van 8 pagina's per minuut voor de kleine printers tot 120 pagina's per minuut voor de zeer grote systemen.

De in dit artikel besproken printer (fig. 1) werkt met een snelheid van 30 afdrukken per minuut en wordt rechtstreeks gekoppeld aan de grote en middelgrote computersystemen van Burroughs. De printer heeft twee invoermagazijnen van elk 500 vel A4-formaat en een uitvoermagazijn voor 1000 vel. Het is mogelijk om zowel enkelzijdig als dubbelzijdig te printen. Er zijn vele fonts (sets van bepaald letter-type en -afmeting) en grafische tekens beschikbaar. Ook kunnen logo's, barcodes en handtekeningen afgedrukt worden. De resolutie van het printwerk is 240 punten per inch.

Hieronder volgt een uiteenzetting van de werking van het printsysteem en vervolgens een globaal overzicht van de aansturing van het systeem door de electronica en de software.

HET PRINTPROCES

De kern van het printproces (fig. 2) wordt gevormd door een lichtgevoelige drum. Deze aluminium drum is bedekt met een dunne laag seleen. Dit seleen geleidt onder invloed van licht.
Hieronder volgen de achtereenvolgende stappen die uiteindelijk tot de print leiden.

Het laden van de drum

De lichtgevoelige drum wordt voorzien van een electrostatische lading. Dit gebeurt via een zgn. "charge-corotron". Een corotron bestaat uit een u-balkje waarbinnen een draad gespannen is. Op deze draad staat een spanning van 5-12 kV. De laadspanning wordt zodanig geregeld, dat de lading op de drum ca. 700 volt bedraagt.

Aanbrengen van de afbeelding

De afbeelding wordt lijn voor lijn op de drum beschreven door middel van gemoduleerd laserlicht. Onder invloed van het laserlicht wordt de drum selectief ontladen. Op de plaatsen waar het laserlicht onderbroken wordt zal de lading behouden blijven. Op deze manier wordt een latente afbeelding gevormd op de drum.

Er is hier gebruik gemaakt van een laserdiode (GaAlAs). Het uitgezonden licht heeft een golflengte van ca 800 um. De laserstraal wordt door een stelsel van lensen scherp gesteld en vervolgens afgebogen door een roterende spiegel met 18 facetten. Het voordeel van dit afbuigsysteem is, dat de op de drum geschreven lijnen vrij zijn van enige terugslag.



fig. 1

Aanbrengen van toner

De gebruikte toner bestaat uit zeer fijne deeltjes van 12 tot 18 um. Deze tonerdeeltjes bestaan voor 85% uit kunststof en voor 15% uit koolstof.

Het tonerstation bestaat uit twee delen. In het bovenste deel bevindt zich de cartridge met toner en een doseerinrichting die de toner toevoer regelt naar het onderste deel. Daar wordt de toner in de richting van de drum getransporteerd. Als transportmiddel wordt gebruik gemaakt van geplastificeerde stalen korrels met een doorsnede van ongeveer 200 um. Door een roermechanisme worden deze stalen korrels - inmiddels omgeven door tonerdeeltjes - naar een tweetal magnetische borstels geleid, die de korreltjes met de toner langs de drum voeren. Door de plaatselijke lading van de drum wordt de toner aangetrokken, terwijl de stalen korrels achterblijven in het tonerstation en opnieuw worden gebruikt.

Overdracht van de afbeelding op het papier

Het papier wordt aan de bovenkant van de drum aangevoerd en met de rotatiesnelheid van de drum gesynchroniseerd. Terwijl het papier in contact komt met de drum wordt de afbeelding overgedragen naar het papier. Dit geschiedt met behulp van een transfer corotron. Deze veroorzaakt een electrostatische lading op het papier, waardoor de tonerdeeltjes door het papier worden aangetrokken. Een tweede corotron, voorzien van een wisselspanning, zorgt ervoor dat het papier weer loskomt van de drum.

Fixeren van de afbeelding

Vervolgens wordt het papier door een fuserstation geleid. Dit bestaat uit twee rollen van siliconenrubber. De onderste van deze rollen wordt van binnenuit verwarmd tot een temperatuur van ca. 173°C. Als het papier door het fuserstation gaat, wordt de toner kortstondig verwarmd, zodat de toner smelt en op het papier gefixeerd wordt.

Het papier wordt vervolgens naar het uitvoermagazijn geleid of via een omkeermechanisme opnieuw doorgevoerd voor het afdrukken van de achterzijde van het papier.

Schoonmaken van de drum

De drum wordt van de resterende lading ontdaan door belichting met lampen en door een corotron voorzien van een wisselspanning. De mogelijk achtergebleven toner ligt hierdoor los op de drum en kan door de vacuumcleaner moeiteloos verwijderd worden. De drum is nu weer gereed om opnieuw geladen te worden.

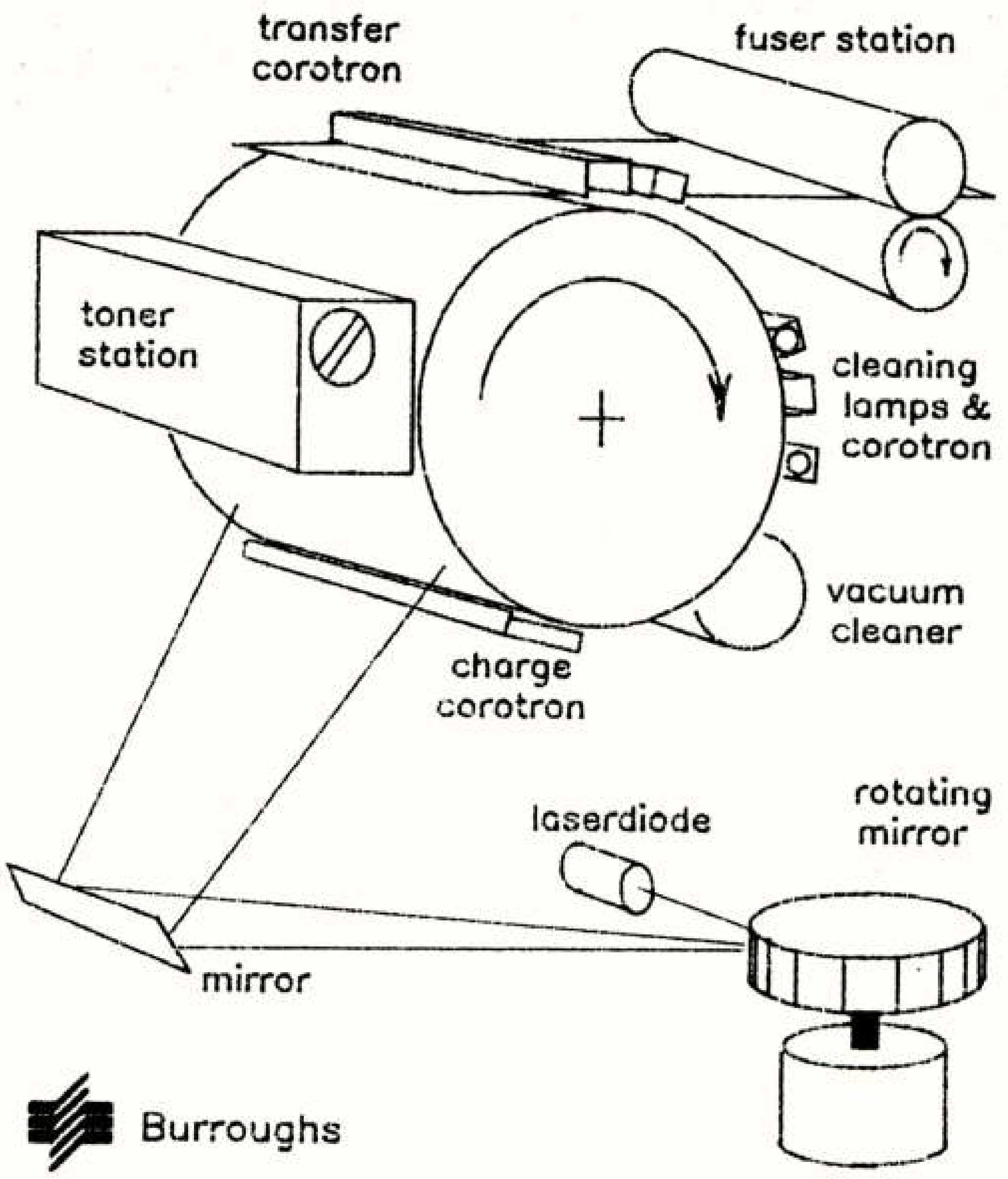


fig. 2

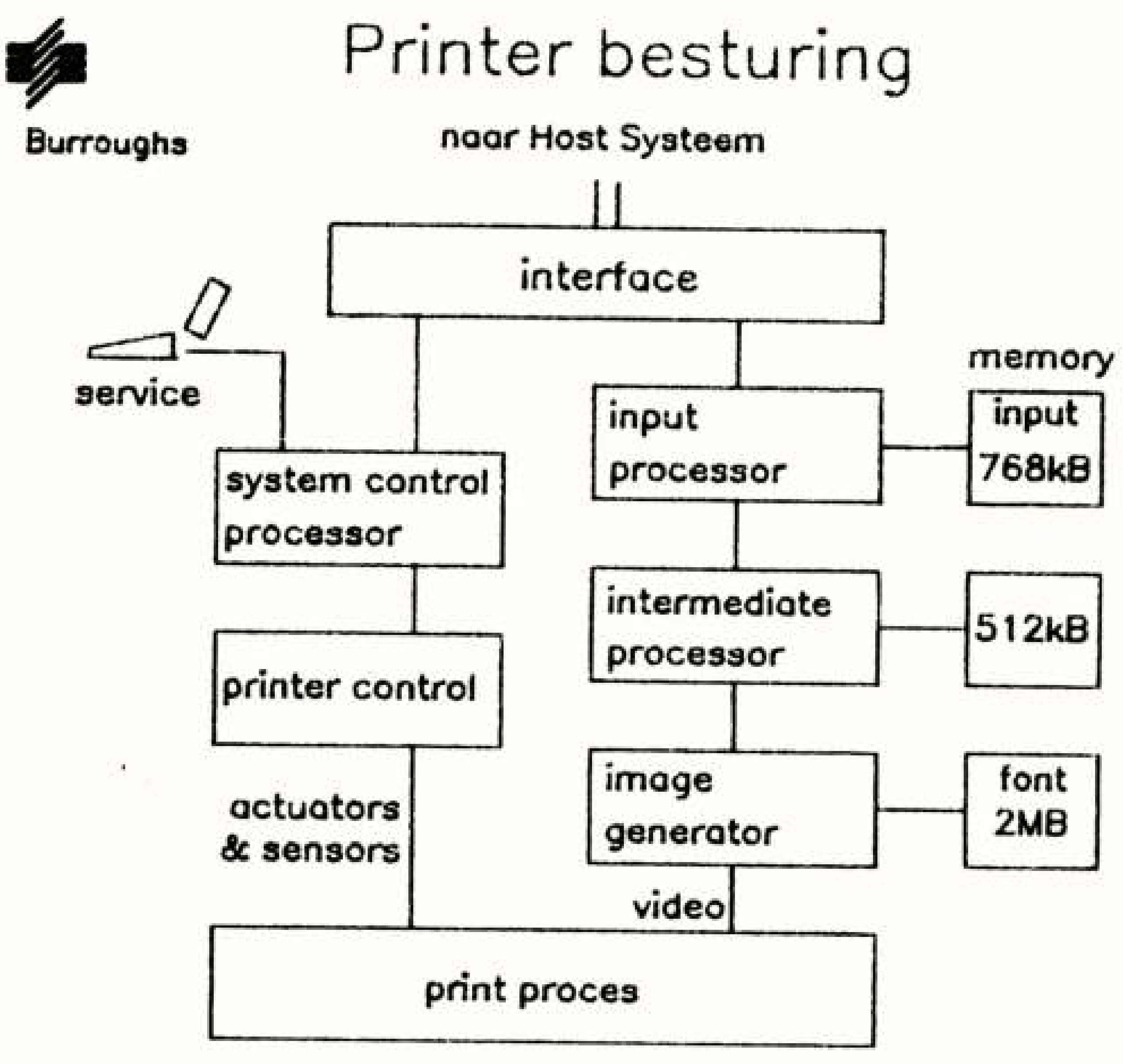


fig. 3

BESTURING VAN HET PRINTPROCES

Alle functies in de printer zijn microprocessorgestuurd. Ruwweg is de besturing (fig. 3) te splitsen in twee delen, die hoofdzakelijk onafhankelijk werken. Het ene deel, de System Control Processor, bestuurt het complete printproces, terwijl het andere deel de afbeelding verzorgt.

De System Control Processor
Deze processor controleert voortdurend alle functies in de printer. Controleert en regelt de spanningen van de corotrons, de lichtintensiteit van de laser en de dosering van de toner. Ook regelt hij de timing en synchronisatie van de papiertoevoer.

Voor het opstarten van de machine en voor testdoeleinden is een eenvoudig operating system aanwezig in de printer. Als de printer online werkt, dan zal het hostsysteem eerst een meer geavanceerd operating system laden, dat vervolgens de contrôle overneemt. Met de System Control Processor is ook een 40-character scherm verbonden en een toetsenbord met 12 toetsen. Het scherm geeft de status van de machine weer en met behulp van het toetsenbord kan de operator in beperkte mate de printafdruk kwalitatief beïnvloeden.
De hoofdfunctie is echter het bereikbaar maken van de processor voor de technicus. Alle afstellingen en timing van de machine worden softwarematig ingebracht. Tevens worden via dit communicatiekanaal de testen geinitieerd in geval van storing en de resultaten worden via het scherm zichtbaar gemaakt.

De Input Processor
Deze processor rangschikt de informatie, die vanaf het Host-systeem gestuurd wordt. Fonts, grafische tekens en logo's worden in het fontmemory geplaatst, de printinformatie en de voorgeprogrammeerde formulieren worden in het inputmemory opgeslagen. Het inputmemory is maximaal 786 kByte groot. Hierin worden tot 12 pagina's gebufferd. Ook kunnen hier vele formulieren opgeslagen worden. Een gemiddeld formulier neemt, afhankelijk van de complexiteit, 5-15 kByte in beslag.

De Intermediate Processor
Hier wordt de pagina samengesteld. Als binnen een pagina een formulier gedefinieerd is, dan zal eerst gecontroleerd worden of dit formulier aanwezig is in het inputmemory. Is dat niet het geval dan zal het formulier automatisch bij het Host-systeem aangevraagd en verstuurd worden. Hetzelfde geschiedt, als een bepaald font niet in het fontmemory aanwezig is. Het aanvragen en versturen van dergelijke informatie geeft nauwelijks vertraging van het printproces.
De aldus gerangschikte informatie wordt overgedragen aan de image generator voor verdere afhandeling.

De Image Generator
Hier wordt het videosignaal gegenereerd, dat de laser moet moduleren.
De pagina wordt opgedeeld in scanlijnen. Deze scanlijnen worden gegenereerd met behulp van de grafische informatie, die voor elk lettertype in het fontmemory is opgeslagen. In dit memory, dat maximaal 2 MByte groot is, kan de grafische informatie opgeslagen worden voor ongeveer 100 verschillende fonts van een lettergrootte, die op schrijfmachines gebruikelijk is. Grotere lettertypen nemen meer geheugen in beslag, met het gevolg, dat minder verschillende fonts gelijktijdig aanwezig kunnen zijn.

TOEPASSINGEN

Met dit printsysteem zijn vele toepassingen te realiseren.
Formulieren kunnen bestaan uit vaste en variabele informatie. Binnen een formulier kunnen weer andere formulieren gedefinieerd worden.
De tekst - of gedeeltes van de tekst - kan in stappen van 90° geroteerd worden.
Door twee of zelfs vier bladzijden informatie op een zijde van een vel af te drukken kan de effectieve printsnelheid verdubbeld of verviervoudigd worden. Binnen een stuk tekst kunnen verschillende lettertypen (fonts) door elkaar gebruikt worden.

De laserprinter is een bijzonder flexibel stuk gereedschap voor het maken van computeroutput van een uitzonderlijk goede kwaliteit.

Voordracht gehouden tijdens de 338e werkvergadering.

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
(337ste werkvergadering)
SECTIE TELECOMMUNICATIETECHNIEK VAN HET KIvI
IEEE BENELUX SECTIE EN
SECTIE VASTE-STOFFYSICA VAN DE NNV

UITNODIGING

voor de lezingendag op **donderdag 31 oktober 1985** in het gebouw voor **Elektrotechniek (zaal A)** van de **Technische Hogeschool** te **Delft.**

THEMA: NIEUWE ONTWIKKELINGEN OP HET GEBIED DER VASTE STOF SENSOREN.

PROGRAMMA:

09.30 - 10.00 uur:	Ontvangst en koffie.
10.00 - 10.15 uur:	**PROF. DR. IR. S. MIDDELHOEK**, (TH Delft); WELKOM EN INLEIDING.
10.15 - 10.45 uur:	**IR. G. A. SCHWIPPERT**, (CME-TNO Delft); SENSORBEHOEFTEN VAN DE NEDERLANDSE INDUSTRIE.
10.45 - 11.15 uur:	Koffiepauze.
11.15 - 11.40 uur:	**IR. L. J. M. ESSER**, (PHILIPS NAT. LAB. Eindhoven); CCD BEELD-SENSOREN.
11.40 - 12.05 uur:	**IR. T. S. J. LAMMERINK**, (TH Twente); EXCITATIE VAN GEÏNTEGREERDE SENSOREN GEBASEERD OP MECHANISCHE RESONANTIE.
12.05 - 12.30 uur:	**IR. A. W. VAN HERWAARDEN**, (TH Delft); GEÏNTEGREERDE SILICIUM VACUUM SENSOR.
12.30 - 14.00 uur:	Lunch.
14.00 - 14.25 uur:	**PROF. DR. IR. P. BERGVELD**, (TH Twente); WAT WAS ER NIEUW IN PHILADELPHIA? (Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators), (Philadelphia 11-14 juni 1985).
14.25 - 14.50 uur:	**DR. IR. V. ZIEREN**, (PHILIPS NAT. LAB. Eindhoven); MAGNEETKOPPEN VOOR VERTIKALE MAGNETISCHE REGISTRATIE.
14.50 - 15.15 uur:	**DR. IR. A. VENEMA**, (TH Delft); GASDETEKTIE MET OPPERVLAKTE-GOLF-KOMPONENTEN.
15.15 - 15.40 uur:	Theepauze.
15.40 - 16.05 uur:	**PROF. DR. IR. S. MIDDELHOEK**, (TH Delft); GEÏNTEGREERDE FLIP-FLOP SENSOREN.
16.05 - 16.30 uur:	**IR. H. J. M. KREUWEL**, (TH Twente); GEÏNTEGREERDE LICHTGELEIDERSENSOREN GEBASEERD OP MODE-KOPPELING VOOR HET METEN VAN ELEKTRISCHE EN CHEMISCHE GROOTHEDEN.

Aanmelding dient te geschieden door inzending van de aangehechte kaart, **gefrankeerd** met een postzegel van 50 cent, alsmede overmaking van de verschuldigde kosten op postrekening 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam onder vermelding van "SENSOREN".

De aanmelding is alleen geldig indien de aanmeldingskaart en overschrijving zijn ontvangen vóór 18 oktober 1985.

De deelname voor leden van NERG, KIvI, IEEE, en NNV en voor studenten is gratis en bedraagt voor introducee's *f* 15,— per deelnemer. De lunchkosten bedragen voor iedereen *f* 15,—. Het boek met lezingen kost *f* 10,— en kan alleen via de aanmeldingskaart worden besteld.

Namens de samenwerkende verenigingen,
DR. IR. P. P. L. REGTIEN, NERG.
Tel. 015 - 784729

Delft, september 1985.

NIEUWE BOVENGRENZEN AAN HET CAPACITEITSGEBIED VAN HET TWEE-WEG KANAAL

A.P. Hekstra

New upperbounds to the capacity region of the two-way channel. In this paper we pursue an information-theoretical approach towards the role of the statistical dependence between the inputs of a discrete memoryless two-way channel. A so called 'dependence balance' is introduced. This idea can be worked out to outer bounds to the capacity region of the general two-way channel. The new outer bound improves the results obtained by Zhang, Berger and Schalkwijk (Zhang,1985). A corollary of the general dependence balance outer bound, a class of two-way channels for which the capacity region equals the Shannon inner bound region, which is a generalization of a result of Willems for the multiple access channel, is presented.

DANKBETUIGING

De hier beschreven resultaten zijn verkregen gedurende mijn afstudeerproject in de vakgroep Informatie en Communicatietheorie van de Technische Hogeschool Eindhoven. Uiterste dankbaarheid wordt betuigd aan mijn afstudeerbegeleider Dr. Frans M.J. Willems voor zijn veeltallige originele bijdragen, alsmede aan het N.E.R.G., dat een presentatie van de het hier beschrevene op het Internationale I.E.E.E. Symposium over Informatietheorie, 1985 in Brighton, Engeland middels een subsidie mogelijk maakte.

I INLEIDING

I - A Het een - weg kanaal

In het historische artikel 'A mathematical theory of communication' (Shannon,1948) presenteerde Shannon een expressie voor het capaciteitsgebied van het algemene een-weg kanaal. Zie figuur 1.

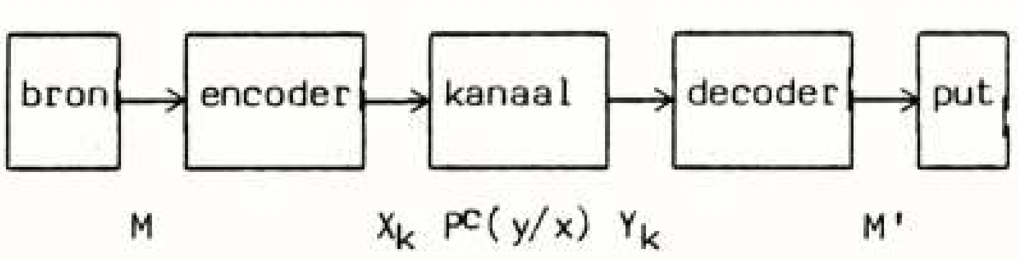


Fig. 1: Een-weg communicatiekanaal

In het communicatiemodel genereert een bron een bericht M. (Bij conventie worden 'random' variabelen door hoofdletters gerepresenteerd.) M neemt met gelijke kans een waarde uit m mogelijkheden aan. Het bericht bevat een hoeveelheid informatie ten bedrage van $\log_2(m)$ bits.

De encoder observeert het bericht M en produceert in successie een n-tal inputs X_k, $k = 1,2,..,n$ voor het kanaal. Een rij

$$X^n := (X_1,X_2,..,X_n) \qquad (1)$$

heet een codewoord. Dezelfde notatie zal ook gebruikt worden voor andere variabelen. Een voorbeeld van een encoder is een Hamming encoder of een Reed-Solomon encoder. De encoder voegt een codewoord aan een bericht toe met behulp van een zogenaamde encoding functie e, als volgt.

$$X_k = e(M,k) \qquad (k = 1,2,..,n) \qquad (2)$$

Het kanaal wordt verondersteld
- een eindig input en output alfabet te hebben,
- geheugenloos te zijn.

A(X) geeft het input alfabet aan, A(Y) het output alfabet. De causaliteit van de kanaalinput variabele X naar de output variabele Y wordt beschreven door de zogenaamde kanaalmatrix $P^c(y/x)$ ('c' is de naam van het betreffende kanaal). Samenvattend, wordt het kanaal gespecificeerd door

$$(A(X),A(Y),P^c(y/x)) \qquad (3)$$

De decoder observeert de outputs Y_k, $k = 1,2,..,n$ van het kanaal. Aan de hand van Y^n maakt de decoder een schatting M' van het verzonden bericht M. Hiertoe past de decoder een decoding functie d toe. In formule,

$$M' = d(Y^n) \qquad (4).$$

Gegeven een kanaal $(A(X),A(Y),P^c(y/x))$, wordt het tuple

$$(m,n,e,d) \qquad (5)$$

een code voor het kanaal genoemd. Het beschrijft de werking van het een-weg communicatiemodel volledig.

Voor een bepaalde code laten zich de zogenaamde gemiddelde informatiesnelheid R, in bits/transmissie

$$R := \log_2(m)/n \qquad (6)$$

en gemiddelde woordfoutenkans

$$P_e := 1 - Pr(M'=M) \qquad (7)$$

berekenen. Het paar (R,P_e) dat aan een code toegevoegd wordt, geeft de kwaliteit van de code aan.

Voorbeeld: De repetitiecode voor het binaire symmetrische kanaal.

Het binaire symmetrische kanaal (BSK) wordt beschreven door

$$(\{0,1\},\{0,1\},p^{bsk}(y/x)),$$

$$p^{bsk}(y/x) = \begin{cases} 1 - p^{bsk} & \text{als } x = y \\ p^{bsk} & \text{anders} \end{cases} \qquad (8).$$

De parameter p^{bsk} is de kans dat de input verwisseld wordt.

De repetitiecode herhaalt een input eenvoudigweg n maal. Zodoende zijn er twee codewoorden (m = 2): de 0-vector en de 1-vector ter lengte n,

$$e(1) = 0^n, \quad e(2) = 1^n \qquad (9).$$

Onderstel n oneven. De decoder neemt een meerderheidsbeslissing.

$$d(y^n) = \begin{cases} 1 & \text{als } y^n \text{ meer 0'en dan 1'en telt,} \\ 2 & \text{anders} \end{cases} \qquad (10).$$

De resulterende (R,P_e) is

$$(R,P_e) = (1/n, \sum_{k\geq(n+1)/2}^{n} \binom{n}{k}(p^{bsk})^k(1-p^{bsk})^{n-k}) \qquad (11).$$

De repetitiecode voor het BSK is een slechte code. Voor kleine foutenkansen, d.w.z. voor grote n, is de informatiesnelheid erg laag. In het vervolg wordt dit nader gekwantificeerd.

Hierboven is een (R,P_e) paar geintroduceerd als een kwaliteitsmaat voor een gegeven code. Ook de omgekeerde benadering is mogelijk. Gegeven een (R,P_e) paar kan de vraag gesteld worden of er codes bestaan die een informatiesnelheid groter of gelijk aan R en een woordfoutenkans niet groter dan P_e hebben. Indien dat het geval is wordt (R,P_e) bereikbaar genoemd. Evenzo wordt een informatiesnelheid R bereikbaar genoemd indien voor iedere willekeurig kleine waarde van P_e, (R,P_e) bereikbaar is.

Dit betekent dat er een (oneindig) lange rij van codes bestaat waarvoor in de limiet de woordfoutenkans naar nul en de informatiesnelheid naar R, of een groter getal, convergeert. Als triviaal voorbeeld: R = 0 bits/transmissie is voor ieder kanaal bereikbaar.

In (Shannon,1948) concipieerde Shannon het capaciteitsgebied $C_1(c)$, en de capaciteit $C_{1max}(c)$ van een een-weg kanaal c,

$$C_1(c) := \{R \geq 0 \mid R \text{ is bereikbaar voor } c\} \qquad (12a)$$

$$C_{1max}(c) := \max(C_1(c)) \qquad (12b).$$

Zie figuur 2.

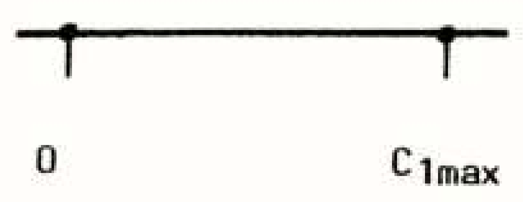


Fig. 2: Het capaciteitsgebied van een een-weg kanaal.

Shannons kanaalcoderingstheorema geeft een algemene expressie voor de capaciteit van het een-weg kanaal,

$$C_1(c) = \{R \geq 0 \mid \text{er bestaat een } P_x \text{, z.d.d. } P(x,y) := P_x(x).P^c(y/x) \quad R \leq I(X;Y)\} \qquad (13).$$

De mutuele informatie $I(X;Y)$ is een functie van de verdeling $P(x,y)$. Raadpleeg bijv. (Gallager,1968) voor de definitie.

Met behulp van de Aritmoto-Blahut algorithme (Csiszar,1981) kan $C_1(c)$ berekend worden. Deze algorithme bepaalt die verdeling over het input alfabet P_x waarvoor de mutuele informatie van de input en output $I(X;Y)$ maximaal is. De optimale waarde levert de capaciteit van het kanaal $C_{1max}(c)$. Derhalve is de conclusie gerechtvaardigd dat het probleem van het bepalen van de capaciteit van een willekeurig geheugenloos een-weg kanaal met eindige input en output alfabets is opgelost.

Voorbeeld: BSK.

De capaciteitsrealiserende inputverdeling P_x voor het BSK is, op grond van symmetrieoverwegingen

$$P_x(0) = P_x(1) = 1/2 \qquad (14).$$

Evaluatie van de mutuele informatie levert de capaciteit van het kanaal:

$$C_1(bsk) = 1 - h(p^{bsk}) \qquad (15)$$

waarbij h(.) de binaire entropy functie is,

$$h(p) := -p\log_2(p)-(1-p)\log_2(1-p) \qquad (16).$$

Zoals eerder geconstateerd blijkt dat de rij van triviale repetitiecodes n= 3,5,7,.. weliswaar een foutenkans heeft die willekeurig klein wordt, maar anderzijds convergeert ook de informatiesnelheid naar nul. Er wordt slechts een bit informatie overgedragen. Voor alle p^{bsk}'s verschillend van 1/2 is de capaciteit van het BSK echter groter dan nul. Zie figuur 3.

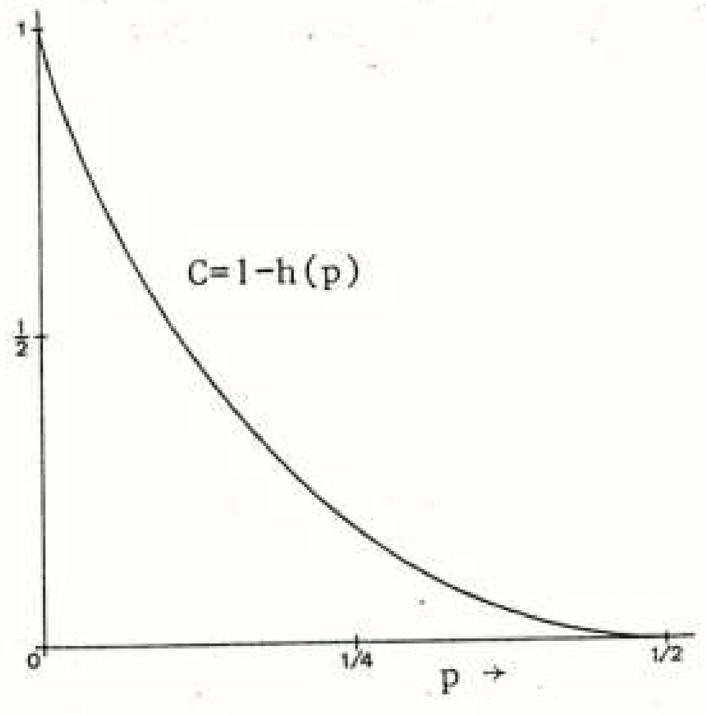


Fig.3: Capaciteit van het BSK

I - B Het twee - weg kanaal

Dit tweede deel van de inleiding verloopt parallel aan het eerste deel. Allereerst wordt een modelbeschrijving van het twee-weg kanaal gegeven, vervolgens de definitie van het capaciteitsgebied $C_2(c)$. In tegenstelling tot het een-weg kanaal, is voor het twee-weg kanaal nog geen zinvolle expressie ter berekening van het capaciteitsgebied bekend.

Shannon is ook de pionier van het twee-weg communicatieprobleem (Shannon,1961). In figuur 4 is het communicatiemodel geschets.

Er zijn twee berichten, M_1 en M_2, aan weerszijde van het kanaal een. Deze berichten dienen uitgewisseld te worden middels een n-tal transmissies. Het twee-weg kanaal is het informatietheoretische model van de dialoog (Schalkwijk,1983). M_1 en M_2 zijn onafhankelijke random variabelen, uniform verdeeld over alfabets ter groote m_1 en m_2, respektievelijk.

De encoders 1 en 2 kennen niet alleen M_1 resp. M_2, maar observeren ook de rij van outputs van het kanaal, Y_1^k resp. Y_2^k. Dit maakt het twee-weg kanaal een veel complexer probleem dan het een-weg kanaal. De encoders worden beschreven door een tweetal encoding functies, e_1 en e_2, als volgt.

$$X_{1k} = e_1(M_1, Y_1^k, k) \qquad (17a)$$

$$X_{2k} = e_2(M_2, Y_2^k, k) \quad (k = 1,2,..,n) \qquad (17b).$$

Het twee-weg kanaal c zelf heeft eindige input alfabets $A(X_1)$, $A(X_2)$ en output alfabets $A(Y_1)$, $A(Y_2)$ en is geheugenloos. De generatie van de outputs Y_1, Y_2 gegeven de inputs X_1, X_2 wordt gespecificeerd door een overgangsmatrix $P^c(y_1,y_2/x_1,x_2)$. Kortweg wordt het twee-weg kanaal aangegeven middels het 5-tuple

$$(A(X_1),A(X_2),A(Y_1),A(Y_2),P^c(y_1,y_2/x_1,x_2)) \qquad (18).$$

Het kanaal wordt n keer gebruikt.

De decoders 1, 2 baseren hun schatting M'_2, M'_1 van het bericht van de andere terminal (zie figuur 3) M_2 resp. M_1 op het eigen bericht M_1 resp. M_2 en de n-rij Y_1 resp. Y_2^n van ontvangen outputs,

$$M'_2 = d_1(M_1, Y_1^n) \qquad (19a)$$

$$M'_1 = d_2(M_2, Y_2^n) \qquad (19b).$$

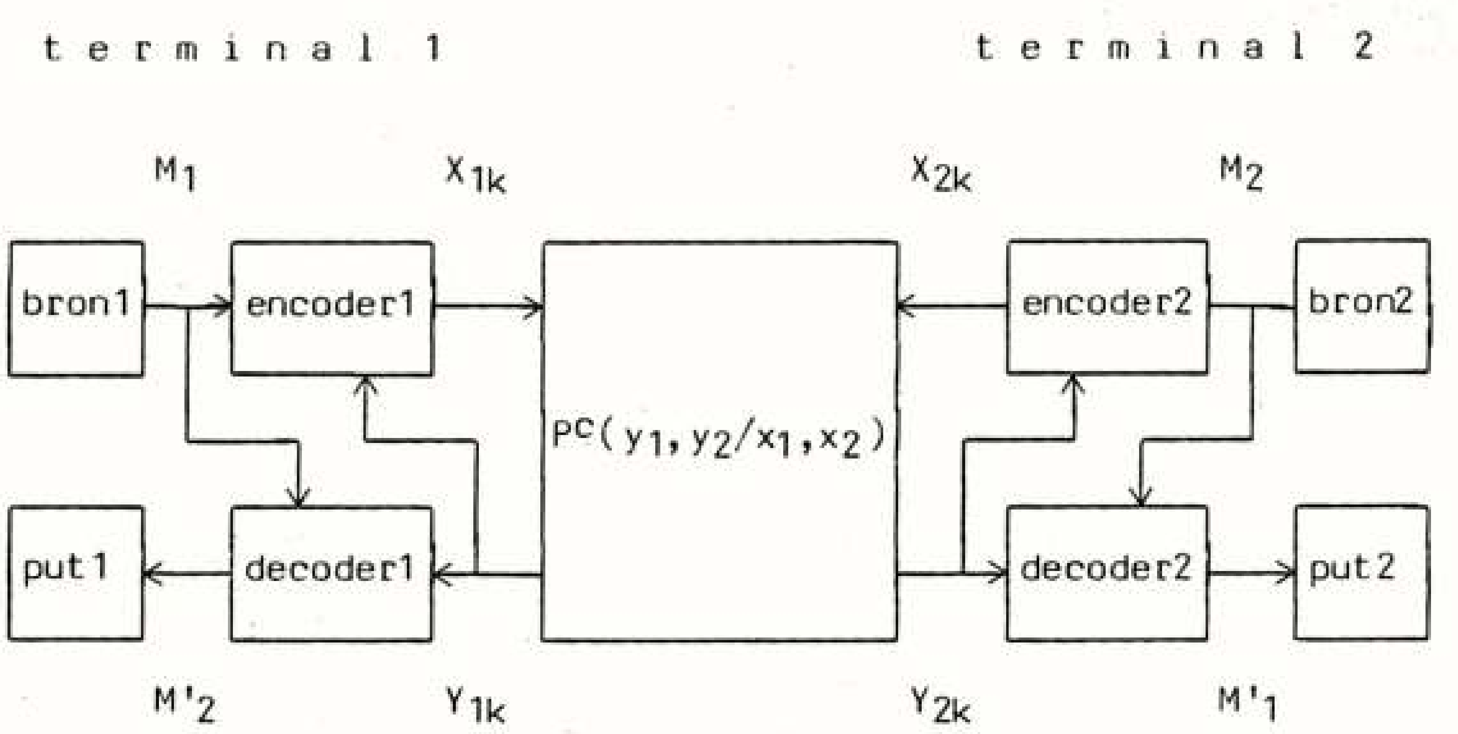


Fig. 4: Twee-weg communicatiemodel

In analogie met het een-weg kanaal wordt de operatie van het twee-weg communicatiemodel, gegeven een kanaal $(A(X_1), A(X_2), A(Y_1), A(Y_2), P^C(y_1, y_2/x_1, x_2))$ volledig beschreven door een code

$$(n, m, e_1, e_2, d_1, d_2) \quad (20).$$

De gemiddelde informatiesnelheden R_1 (van terminal 1 naar terminal 2) en R_2 (vice versa) van een code,

$$R_1 := \log_2(m_1)/n \quad (21a)$$

$$R_2 := \log_2(m_2)/n \quad (21b)$$

en de gemiddelde woordfoutenkansen

$$P_{e1} := 1 - \Pr(M_1' \neq M_1) \quad (22a)$$

zijn eenvoudig te berekenen.

Een paar (R_1, R_2) heet bereikbaar indien er een rij van codes bestaat waarvoor de woordfoutenkansen naar nul en simultaan de informatiesnelheden naar (R_1, R_2) convergeren. Alle informatiesnelheden worden impliciet niet-negatief verondersteld.

Het capaciteitsgebied $C_2(c)$ van een twee-weg kanaal c is gedefinieerd als de verzameling van alle bereikbare (R_1, R_2),

$$C_2(c) := \{(R_1, R_2) \mid (R_1, R_2) \text{ bereikbaar voor } c\} \quad (23)$$

Twee elementaire eigenschappen van $C_2(c)$ zijn

1. Projectiviteit:

$$(R_1, R_2) \in C_2(c),\ Q_1 < R_1,\ Q_2 < R_2$$

$$\text{impliceert} \quad (Q_1, Q_2) \in C_2(c) \quad (24)$$

'punten die dichter bij de assen liggen, zijn ook elementen van $C_2(c)$', zie figuur 5a.

2. Convexiteit:

$$(Q_1, Q_2) \in C_2(c),\ (S_1, S_2) \in C_2(c),\ 0 < \beta < 1,$$

$$(R_1, R_2) := \beta(Q_1, Q_2) + (1-\beta)(S_1, S_2)$$

$$\text{impliceert } (R_1, R_2) \in C_2(c) \quad (25)$$

'als twee punten element van $C_2(c)$ zijn, liggen alle punten op het verbindingslijnstuk tussen beide punten ook in $C_2(c)$', zie figuur 5b.

De interpretatie van beide eigenschappen is de volgende. Projectiviteit: het is altijd mogelijk om de informatieoverdracht van een code te verkleinen door m_1 en m_2 te verkleinen.

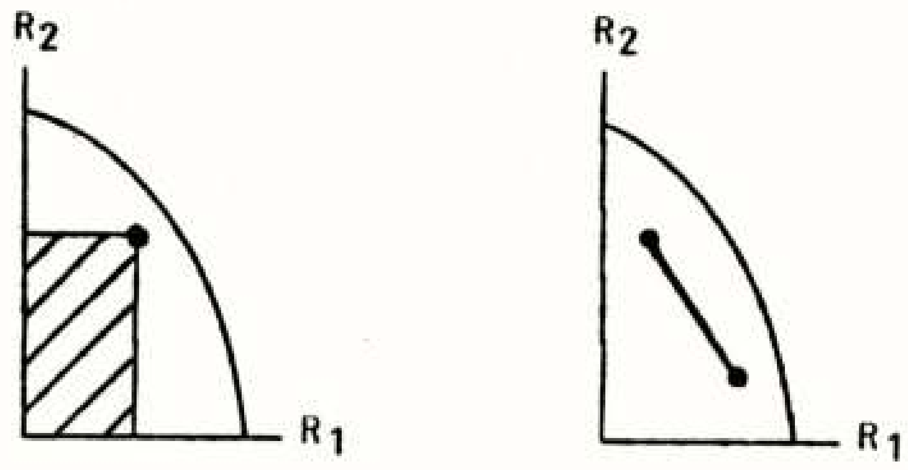


Fig. 5a: Projectiviteit. Fig. 5b: Convexiteit.

Convexiteit komt neer op het timesharen van codes. Bijvoorbeeld: een code 1 en een code 2 (woordlengtes n_1 en n_2) worden geconcateneerd (lengte $n_1 + n_2$). Indien $n_1 = n_2$, zal het (R_1, R_2) paar dat overeenkomt met de nieuwe code precies het gemiddelde zijn van de paren behorende bij de originele codes. In het algemeen wordt in een bepaalde fractie β van de transmissies een code 1, in de resterende fractie $1 - \beta$ een code 2 gebruikt.

Tot op heden bestaat er geen algorithme, met een eindige complexiteit, die het capaciteitsgebied van een willekeurig twee-weg kanaal berekent. Tot de belangrijkste resultaten van Shannons artikel 'Two-way communication channels' (Shannon, 1961) behoren een algemene ondergrens $I_2(c)$ en bovengrens $O_2(c)$ aan het capaciteitsgebied $C_2(c)$,

$$I_2(c) \subseteq C_2(c) \subseteq O_2(c) \quad (26)$$

Het bewijs dat

$$I_2(c) \subseteq C_2(c) \quad (27)$$

wordt geleverd door aan te tonen dat alle punten (R_1, R_2) bereikbaar zijn voor c.

$I_2(c)$ is als volgt gedefinieerd. De functie 'co' berekent de convex omhullende van een gebied. Uit het hierboven beschreven timesharing argument volgt dat de convex omhullende van een bereikbaar gebied eveneens een bereikbaar gebied is.

$$I_2(c) := \mathrm{co}\Big(\{(R_1, R_2) \mid \text{er bestaan } P_{X1}, P_{X2}$$
$$P(x_1, x_2, y_1, y_2) := P_{X1}(x_1)P_{X2}(x_2) \cdot P^C(y_1, y_2/x_1, x_2)$$
$$R_1 < I(X_1; Y_2/X_2)$$
$$R_2 < I(X_2; Y_1/X_1)\}\Big) \quad (28)$$

Wanneer (28) vergeleken wordt met Shannon's expressie voor het capaciteitsgebied $C_1(c)$ van het een-weg kanaal, blijkt dat er nu twee informatiesnelheden (R_1, R_2), twee inputverdelingen P_{X1}, P_{X2} en twee mutuele informa-

ties zijn. Merk op dat de inputverdeling een productverdeling is, de input variabelen X_1 en X_2 zijn statistisch onafhankelijk.

De mutuele informaties in (28) zijn zogenaamde conditionele mutuele informaties (Csiszar,1981).

Bijvoorbeeld: $I(X_1;Y_2/X_2)$ (spreek uit 'de mutuele X_1 en Y_2 gegeven X_2') is een maat voor de informatie die X_1 en Y_2 'gemeenschappelijk' hebben, waarbij de informatie die X_2 representeerd bekend verondersteld wordt. Immers, terminal 2, waar de informatie die van 1 naar 2 verzonden is gedecodeerd wordt, kent zijn eigen input X_2. $I(X_1;Y_2/X_2)$ kan opgevat worden als de 'hoeveelheid informatie die van terminal 1 naar terminal 2 stroomt' bij een gegeven verdeling (P_{x1},P_{x2}) van de inputvariabelen.

Niet alleen de expressies maar ook de bereikbaarheidsbewijzen voor $C_1(c)$ en $I_2(c)$ vertonen duidelijke overeenkomsten. De bereikbaarheid van $I_2(c)$ wordt bewezen m.b.v. codes waarbij de encoders geen acht slaan op de reeds ontvangen kanaaloutputs,

$$X_{1k} = e_1(M_1,k) \quad (29a)$$

$$X_{2k} = e_2(M_2,k) \qquad k = 1,2,..,n \quad (29b).$$

Uit de statistische onafhankelijkheid van de berichten M_1, M_2 volgt dat ook de kanaalinputs X_{1k} en X_{2k} volgens (29) onafhankelijk zijn. Dit feit wordt weerspiegeld in de onafhankelijkheid van de inputvariabelen X_1 en X_2 in de definite van $I_2(c)$.

Shannons bovengrens $O_2(c)$ is gedefinieerd door

$$O_2(c) := \{(R_1,R_2)\,|\, \text{er bestaat een } P_{x1x2}$$
$$P(x_1,x_2,y_1,y_2) := P_{x1x2}(x_1,x_2).\,P^c(y_1,y_2/x_1,x_2)$$
$$R_1 \leqslant I(X_1;Y_2/X_2)$$
$$R_2 \leqslant I(X_2;Y_1/X_1) \quad \} \quad (30)$$

Afgezien van het feit dat $O_2(c)$ zonder convexificatie al convex is, is het verschil met de definitie van $I_2(c)$ dat de verdeling van de inputvariabelen in $O_2(c)$ algemeen is, geen productverdeling hoeft te zijn. De konstatering

$$I_2(c) \subseteq O_2(c) \quad (31)$$

is eenvoudig te verifieren.

Bij de ondergrens kon de beperking gemaakt worden tot relatief eenvoudige codes (29), hetgeen leidt tot de onafhankelijkheid van de inputvariabelen X_1 en X_2 in (28). Bij een bovengrens aan het capaciteitsgebied moeten echter alle mogelijke codes $(n,m_1,m_2,e_1,e_2,d_1,d_2)$ beschouwd worden. Dit maakt de verdeling van X_1 en X_2 in de definitie (30) van $O_2(c)$ algemeen, niet noodzakelijkerwijze een produktverdeling.

Beschouw het zogenaamde binaire vermenigvuldingskanaal (BVK) als voorbeeld van een twee-weg kanaal waarvoor de Shannon onder- en bovengrens (Shannon,1961) verschillen. Het BVK wordt beschreven door het 5-tuple

$$(\{0,1\},\{0,1\},\{0,1\},\{0,1\},p^{bmk}(y_1,y_2/x_1,x_2)),$$

$$p^{bmk}(y_1,y_2/x_1,x_2) = \begin{cases} 1 & \text{indien } y_1 = y_2 = x_1.x_2 \\ 0 & \text{anders} \end{cases} \quad (32)$$

De symmetrische $(R_1 = R_2)$ punten op de rand van $I_2(bvk)$, $O_2(bvk)$ zijn resp. (0.61695,0.61695) bit/transm., (0.69424,0.69424) bit/transm.. In (Schalkwijk, 1985) zegt Schalkwijk het optimale bereikbare punt (0.63056,0.63056) bit/transm. voor dit kanaal te hebben gevonden.

In deze inleiding is achtereenvolgens het informatietheoretische een-weg en twee-weg kanaal communicatiemodel geintroduceerd. Van de door Shannon bereikte resultaten zijn de belangrijkste aangegeven: voor het een-weg kanaal het kanaalcoderingstheorema, voor het twee-weg kanaal de algemene onder- en bovengrens aan het capaciteitsgebied. Het cruciale verschil tussen beide grenzen, de (on)afhankelijkheid van de inputvariabelen is belicht.

II EEN AFHANKELIJKHEIDSBALANS VOOR HET TWEE-WEG KANAAL

In deze sectie wordt het idee van een afhankelijkheidsbalans voor het twee-weg kanaal geintroduceerd. Dit idee is de basis van een aantal nieuwe bovengrenzen aan het capaciteitsgebied van het algemene discrete geheugenloze twee-weg kanaal.

Vanaf dit punt wordt aangenomen dat de kanaaloutputs y_1 en y_2 identiek zijn.

$$y_1 = y_2 =: y \quad (33).$$

Het idee van een afhankelijkheidsbalans zal uiteengezet worden aan de hand van het voorbeeld twee-weg kanaal VB1, gedefinieerd door

$$A(X_1) = A(X_2) = \{0,1\} \quad (34a)$$

$$A(Y) = \{0,1,2\} \quad (34b).$$

De kanaalmatrix is schematisch weergegeven in figuur 6.

Veronderstel

$$I_2(vb1) \neq C_2(vb1) \quad (35)$$

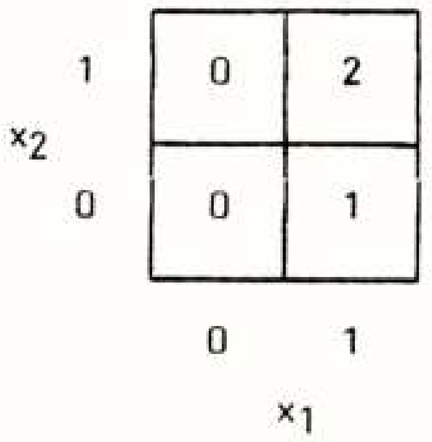


Fig. 6: Kanaalovergangsmatrix van VB1

Neem een willekeurige zogenaamde a priori verdeling P_{x1x2} van de inputvariabelen aan. Beschouw de mogelijke a posteriori verdelingen $P_{x1x2/y}(\cdot,\cdot/y)$, $y = 0,1,2$ van de inputs x_1 en x_2 gegeven de output y.

$$
\begin{aligned}
&P_{x1x2/y}(1,0/1) = 1 \\
&P_{x1x2/y}(1,1/2) = 1 \qquad (36) \\
&P_{x1/y}(0/0) = 1
\end{aligned}
$$

Zie figuur 7.

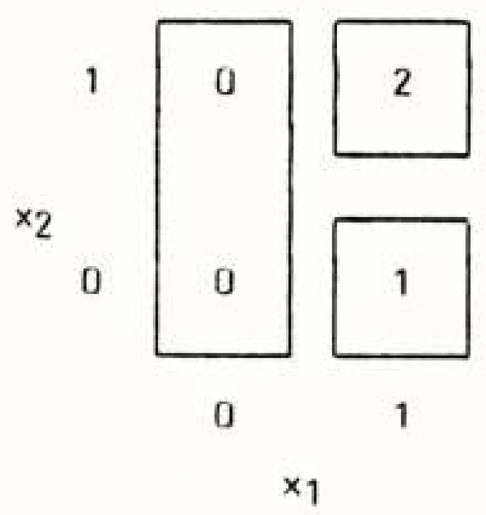


Fig. 7: A posteriori verdeling van x_1, x_2.

De volgende observatie is belangrijk. Voor alle y is $P_{x1x2/y}(\cdot,\cdot/y)$ een produktverdeling.

$$P_{x1x2/y}(x_1,x_2/y) = P_{x1/y}(x_1/y).P_{x2/y}(x_2/y) \qquad (37)$$

Dit is eenvoudig te verifieren aan de hand van figuur 7 en (36).

De Shannon ondergrens $I_2(vb1)$ is geconstrueerd als de verzameling van alle (R_1,R_2) die bereikbaar zijn met codes waarbij de inputvariabelen onafhankelijk verdeeld zijn. Dit wetende impliceert de aanname (35) dat er voor VB1 codes bestaan waarbij de kanaalinputvariabelen X_1, X_2 in sommige transmissies, niet onafhankelijk zijn. We zullen ons nu concentreren op de vraag of dit mogelijk is.

Op grond van het causaliteitsprincipe moet een a priori afhankelijkheid van de inputvariabelen in de k^e transmissie gebaseerd zijn op de de k-1 voorgaande transmissies, in het bijzonder op de a posteriori afhankelijkheden in deze transmissies. (Beide terminals kennen Y^{k-1}, de outputs van de vorige transmissies.) In (37) is echter gebleken dat a posteriori er altijd onafhankelijkheid heerst. De berichten M_1 en M_2 zijn onafhankelijk gegenereerd en kunnen dus ook geen aanleiding geven tot a priori afhankelijkheid van de inputvariabelen.

Hiermede is een tegenspraak bereikt en geconcludeerd mag worden dat (35) onjuist is,

$$C_2(vb1) = I_2(vb1) \qquad (38).$$

De rol die de afhankelijkheid tussen X_1 en X_2 speelt kan meer aanschouwelijk gemaakt worden door afhankelijkheid als iets materieels voor te stellen.

Iedere transmissie verbruikt een hoeveelheid a priori afhankelijkheid en laat een hoeveelheid a posteriori afhankelijkheid na. (Er geldt geen wet van behoud van afhankelijkheid.) In het algemeen maakt een netto afhankelijkheidsverbruik van een transmissie grotere informatiestromen in die transmissie mogelijk.

Het bovenstaande, als causaliteitsprincipe aangeduide argument laat zich formeel uitwerken. Beschouw de k^e transmissie. Definieer

$$I(X_{1k};X_{2k}/Y^{k-1}) \qquad (39a)$$

en

$$I(X_{1k};X_{2k}/Y_k,Y^{k-1}) \qquad (39b)$$

als de hoeveelheid a priori resp. aposteriori afhankelijkheid van de inputvariabelen, respektivelijk. Hiermede is het begrip afhankelijkheid niet langer de tegenstelling van onafhankelijkheid maar een continue maat, informatietheoretisch gedefinieerd.

Bij onafhankelijkheid neemt de maat zijn minimum, nul, aan. Het maximum $\log_2(\#(A(X))$ treedt bijv. op als X_1 en X_2 identiek zijn en uniform verdeeld. ($\#(.)$ berekent het aantal elementen in een verzameling.)

De zogenaamde afhankelijkheidsbalans luidt nu

$$\sum_{1\leqslant k\leqslant n} I(X_{1k};X_{2k}/Y^{k-1}) \leqslant \sum_{1\leqslant k\leqslant n} I(X_{1k};X_{2k}/Y^k,Y^{k-1}) \qquad (40).$$

Het linkerlid van de balans representeerd 'de totale afhankelijkheidsconsumptie', het rechterlid 'de totale afhankelijkheidsproduktie'.

Bijvoorbeeld in het geval van VB1 zijn alle termen in het rechterlid nul en dus moeten alle a priori afhankelijkheden $I(X_{1k};X_{2k}/Y^{k-1})$ nul zijn. Dit voert tot de conclusie dat het capaciteitsgebied gebied gelijk is aan de Shannon ondergrens.

Resumerend. Concentrerende op het belangrijkste verschil tussen de Shannon ondergrens en bovengrens, de statistische afhankelijkheid van de inputvariabelen, is er een balans geformuleerd met behulp waarvan zich, voor sommige kanalen, het capaciteitsgebied laat bepalen. In de volgende sectie zal worden aangegeven hoe zich de in dit deel aan de hand van een eenvoudig voorbeeld besproken ideeen laten uitwerken tot verscherpingen van de algemene Shannon bovengrens.

III NIEUWE BOVENGRENZEN VOOR HET TWEE-WEG KANAAL

In het inleidende deel I-B is niet ingegaan op een aantal recente resultaten van Zhang, Berger en Schalkwijk (Zhang,1985).

Gebruikmakende van de afhankelijkheidsbalans is er een bovengrens geformuleerd (Hekstra,1985) die voor het BVK een verscherping van een resultaat van Zhang, Berger en Schalkwijk betekent. Het zou te ver voeren dit resultaat hier uiteen te zetten.

Hier beperken we ons tot de definitie van een klasse K van twee-weg kanalen waarvan het capaciteitsgebied gelijk is aan de Shannon ondergrens en een schets van het bijbehorende bewijs. Deze klasse is een veralgemenisering van Willems klasse van multiple access kanalen met feedback waarvoor het capaciteitsgebied gelijk is aan de Cover-Leung ondergrens (Willems,1982).

Voor het kanaal VB2 uit de klasse K dat aan het einde van deze sectie besproken zal worden verschilt (Hekstra,1985) zowel de Shannon bovengrens als de grens van Zhang, Berger en Schalkwijk van de Shannon ondergrens.

Definitie.

Een kanaal $P(y/x_1,x_2)$ is een element van K dan en slechts dan als er twee funcites f_1, f_2 en een alfabet $A(B)$ bestaan,

$$f_1: A(X_1) \times A(Y) \rightarrow A(B) \qquad (41a)$$

$$f_2: A(X_2) \times A(Y) \rightarrow A(B) \qquad (41b)$$

zodanig dat

$$f_1(x_1,y) = f_2(x_2,y) =: b \qquad (42a)$$

$$I(X_1;X_2) = 0 \text{ impliceert } I(X_1;X_2/Y,B) = 0 \qquad (42b).$$

Terminal 1 en 2 kunnen met f_1 resp. f_2 een variabele B bepalen. B kan als een extra output van het kanaal worden opgevat. Zie figuur 8.

B dient zodanig te zijn, dat indien X_1 en X_2 a priori onafhankelijk zijn, er ook a posteriori onafhankelijkheid tussen de input variabelen, nu gegeven (Y,B) i.p.v. gegeven Y, heerst.

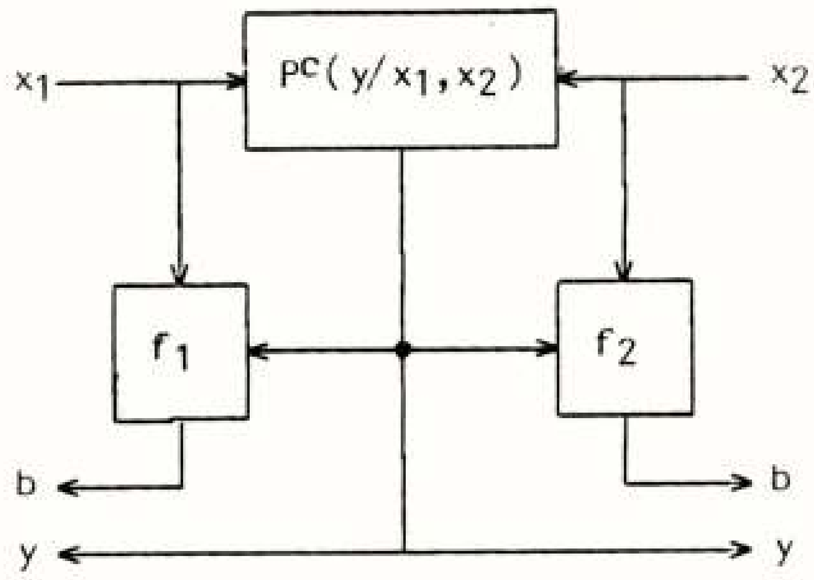


Fig. 8: B is een 'impliciete' output van het kanaal.

Uit het voorbeeld in het vervolg zal duidelijk worden dat het 'expliciet' maken van de 'impliciete' output B, de a posteriori afhankelijkheid verkleind. Namelijk, aannemende dat X_1 en X_2 onafhankelijk zijn gegeven (Y,B) is dit niet het geval geconditioneerd op Y alleen.

Schets van het bewijs.

Het hier van toepassing zijnde bewijs is vergelijkbaar met de in deel II gegeven argumentatie. Het verschil is dat voor het voorbeeld in deel II de a posteriori afhankelijkheid altijd nul is, onafhankelijk van de a priori verdeling van X_1 en X_2. Voor de elementen van K is de a posteriori afhankelijkheid alleen dan nul indien de a priori afhankelijkheid nul is.

x_2 \ x_1	0	1	2
2	1	1	0
1	0	2	1
0	2	0	1

Fig. 9a: Kanaalmatrix VB2

y \ x_1	0	1	2
2	0	1	-
1	0	0	1
0	0	1	2

Fig. 9b: f_1 voor VB2

x_2 \ y	0	1	2
2	2	0	-
1	0	1	1
0	1	1	0

Fig. 9c: f_2 voor VB2

x_2 \ x_1	0	1	2
2	0	0	2
1	0	1	1
0	0	1	1

Fig. 9d: $b(x_1,x_2)$

Dientengevolge is in dit bewijs een <u>induktieargument</u> onmisbaar. In de eerste transmissie zijn de inputs onafhankelijk, a priori op grond van de onafhankelijkheid van de berichten M_1, M_2, en dus a posteriori op grond van de kanaaleigenschap. Nu kan worden aangetoond dat in de tweede transmissie de inputvariabelen a priori ook onafhankelijk zijn, etc.

<u>Voorbeeld:</u> VB2

Het is eenvoudig verifieerbaar dat het kanaal waarvan de kanaalmatrix schematisch is weergegeven in figuur 9a een element is van K. Figuren 9b en c geven de functies f_1, f_2 weer. In figuur 9d is b als een functie van x_1 en x_2 weergegeven.

REFERENTIELIJST

I. Csiszar and J. Körner,
<u>Information theory: coding theorems for discrete memoryless systems</u>,
Budapest: Akademia Kiado, 1981

R.G. Gallager,
<u>Information theory and reliable communication</u>,
New York: Wiley, 1968.

A.P. Hekstra,
'Dependence balance outer bounds for the equal output two-way channel and the multiple access channel with feedback',
T. H. Eindhoven, afd. Elektrotechniek, mei 1985

J.P.M. Schalkwijk,
'On an extension of an achievable rate region for the binary multiplying channel',
<u>I.E.E.E. Trans. on Inform. Theory</u>, vol. IT-29, pag. 445-448, mei 1983.

J.P.M. Schalkwijk,
'The capacity region of the binary multiplying channel - A converse',
voorgelegd aan IEEE Trans. on Inform. Theory, 1985.

C.E. Shannon,
'A mathematical theory of communication',
<u>Bell Systems Technical Journal</u>, vol. 27, pag. 379-423, juli 1948.

C.E. Shannon,
'Two-way communication channels',
herdrukt in <u>Key papers in the development of information theory</u>, ed. D. Slepian,
New York: IEEE, pag. 339-372, 1974.

F.M.J. Willems,
<u>Informationtheoretical results for the discrete memoryless multiple access channels</u>,
Ph.D. dissertatie, Kath. Univ. Leuven, 1982.

F.M.J. Willems
'The feedback capacity region of a class of discrete memoryless multiple access channels',
<u>IEEE Trans. on Inform. Theory</u>, vol. IT-28, pag. 93-95, jan. 1982.

Z. Zhang, T. Berger, J.P.M. Schalkwijk,
'New outer bounds to capacity regions of two way channels',
voorgelegd aan IEEE Trans. on Inform. Theory, 1985.

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden

Ir. P.A. Beeckman, Volderhof 30, 5709 GA Helmond.
Ir. J.W.M. Bergmans, Lichtenberg 62, 5655 BH Eindhoven.
Ir. G. Ossewaarde, Dunantstraat 861, 2713 TG Zoetermeer.
Ir. J.A. Stemerdink, Burg. Keijzerlaan 223, 2262 BH Leidschendam.
Ing. H. van der Weijden, Stoholm 55, 2133 KD Hoofddorp.

Nieuwe leden

Dr. A.J. Borgers, Valklaan 29, 3722 ZJ Bilthoven.
Ir. A. Diekema, Offenbachlaan 14, 2253 CR Voorschoten.
Ir. R.J. Hankel, Kerstroos 2, 2317 EW Leiden.
Ir. C.M. Huizer, Berg 88, 5508 AX Veldhoven.
Ir. H.J. Welmer, Melissehof 14, 7641 GC Wierden.
Ir. P. van der Wurf, Bosrand 92, 5665 ES Geldrop.

Nieuwe adressen van leden

Ir. W. van Eck, Rosmolen 178, 2317 SN Leiden.
Ir. P.J. Haubrich, Meyersweg 21, D 4005 Meerbusch-2, W.-Duitsland.
Ir. T.M.M. Kremers, Wagnerlaan 1, 5583 ZE Aalst Waalre.
Ing. L.M.C. Muijtjens, Eikenlaan 22, 6176 DE Spaubeek.
M. van Sliedregt, H. Dunantweg 133, 7161 WB Neede(Gld.)
Ir. L. Tijben, Burg. v. Geusauweg 30, 4191 KW Geldermalsen.

Overleden

Ir. M.H.P. van Iersel, Winkelsestraat 15, 5074 PA Udenhout.
Ir. J. Rodriques de Miranda, Busken Huetstraat 37, 5615 NH Eindhoven.
Prof. ir. F.H. Stieltjes, Ansbalduslaan 44, 5581 CX Waalre.

NEDERLANDS ELEKTRONICA- EN RADIOGENOOTSCHAP
(338ste werkvergadering)
SECTIE TELECOMMUNICATIETECHNIEK VAN HET KIvI
IEEE BENELUX SECTIE



DR. L. J. VAN RUYVEN

UITNODIGING

voor de lezingendag op **dinsdag 26 november 1985** in het gebouw van de **afd. der Elektrotechniek (collegezaal E hoog)** van de **Technische Hogeschool** te **Eindhoven.**

THEMA: LASERS EN LASERTOEPASSINGEN.

PROGRAMMA:

10.00 - 10.30 uur: **DR. G. J. ERNST**, (TH Twente, Afd. der Techn. Nat.); LASERS EN HUN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN.

10.30 - 11.00 uur: **DRS. R. J. L. LEROU**, (Fys. en Elektron. Lab.-TNO, Den Haag); AFSTANDSMETING MET BEHULP VAN LASERS.

11.00 - 11.30 uur: Koffiepauze.

11.30 - 12.15 uur: **DR. L. J. VAN RUYVEN**, (Philips-USFA, Eindhoven); FIBER OPTISCHE GYROSCOPEN.

12.15 - 14.00 uur: Lunch.

14.00 - 14.30 uur: **DR. A. HAHNE**, (ESTEC, Noordwijk); CO_2 LASER INTERSATELLITE COMMUNICATION.



DR. C. J. NONHOF

14.30 - 15.15 uur: **DR. C. J. NONHOF**, (Centrum voor Fabricage Technologie, Philips, Eindhoven); LASERS IN DE FABRICAGE.

15.15 - 15.40 uur: Theepauze.

15.40 - 16.10 uur: **ING. A. M. BUTTER**, (Burroughs, Amstelveen); LASERPRINTING.

Aanmelding dient te geschieden door inzending van de aangehechte kaart, **gefrankeerd** met een postzegel van 50 cent, alsmede overmaking van de verschuldigde kosten op postrekening 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam onder vermelding van "LASERS".



ING. A. M. BUTTER

De aanmelding is alleen geldig indien de aanmeldingskaart en overschrijving zijn ontvangen vóór 19 november 1985.

De deelname voor leden van NERG, KIvI, IEEE en voor studenten is gratis en bedraagt voor introducee's *f* 15,— per deelnemer. De lunchkosten bedragen voor iedereen *f* 15,—.

Namens de samenwerkende verenigingen,
DR. G. W. M. VAN MIERLO, NERG.
Tel. 070 - 264221 tst. 307

Den Haag, oktober 1985.

Conferentieaankondigingen

ICDSC-7th International conference on digital satellite communications. München, 12-16 May 1986. Contactadres: VDE-Zentralstelle Tagungen ICDSC-7; Stresemannallee 15; D-6000 Frankfurt-Main 70; F.R. of Germany.

Communications - An Industry on the move. Birmingham U.K.; 13-15 May 1986; Contactadres: Communications 86, Conference Services, IEE; Savoy Place; London WC2R OBL; U.K. Tel. 01-240 1871 Ext: 222.

3e Europäisches medien-symposium on "Telekommunication - Netzwerk der Macht". Innsbrück 4-6 Juni 1986; Contactadres: Kongresshaus Postfach 533 Innsbrück; tel. 05222/36521-0.

Second International Conference on: Power System Monitoring and Control, University of Durham, U.K.; Contactadres: Conference Services, IEE; Savoy Places; London WC2R OBL; U.K.; Tel. 01-240 1871 Ext: 222.

8th International conference on computer communication. München; 15-19 september 1986. Contactadres: VDE-Zentralstelle Tagungen ICCC '86; Stresemannallee 15; D-6000 Frankfurt-Main 70; F.R. of Germany.

Microtechnologie t.b.v. transducenten. Technische Hogeschool Twente; 30-31 oktober. Contactadres: THT; Postbus 217; 7500 AE Enschede; Tel. 053-892760.

Forum 87, Partie 2. Les services de télécommunication pour la communauté mondiale des nations". Genève; 22-27 octobre 1987. Contactadres: Secretariat du Forum 87; Union internationale des télécommunications; CH-1211 Genève 20. Tel. +41 22995190.

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap.

Inhoud

deel 51 - nr. 2 - 1986

blz. 29 Lasers en hun toepassing, door Dr. G.J. Ernst.
blz. 33 De fiber optische gyroscoop, door Dr. L.J.van Ruyven.
blz. 39 CO_2 laser intersatellite communication, door Dr. A.Hahne.
blz. 45 Laserprinting, door Ing. A.M.Butter
blz. 48 Werkvergadering 337.
blz. 49 Nieuwe bovengrenzen aan het capaciteitsgebied van het twee-weg kanaal, door A.P.Hekstra.
blz. 55 Uit het NERG. Ledenmutaties.
blz. 56 Werkvergadering 338.

druk: De Witte Eindhoven